INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

# annales agronomiques

Bimestriel

1971

Vol. 22. N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann. agron.*, 1971, **22** (1), 5-41.

# UNE MÉTHODE D'ANALYSE PHYTOLOGIQUE DES PRAIRIES.

## CRITÈRES D'APPLICATION

Ph. DAGET et J. POISSONET

*Centre d'Études phytosociologiques et écologiques, 34 - Montpellier*
*Centre national de la Recherche scientifique*

RÉSUMÉ

Les auteurs décrivent une technique simple d'étude de la végétation des herbages ; elle consiste à recenser les présences des espèces à la verticale de 100 points disposés régulièrement le long de lignes. Le matériel utilisé varie selon la hauteur des peuplements étudiés : double-mètre couché sur le sol avec lecture ponctuelle tous les 4 cm dans les peuplements denses et ras et longue baïonnette plantée dans le sol tous les 20 cm dans les peuplements denses et hauts avec lecture le long du fil.

Des normes d'interprétation et des abaques sont données, permettant d'obtenir, par exemple, l'intervalle de confiance des observations.

Diverses notions essentielles sont définies : fréquences centésimales (FC), contributions spécifiques (CS), etc. Sur la base des diverses contributions spécifiques enregistrées, ils définissent, dans les prairies artificielles, les notions de salissement et de dégradation.

Pour les pâturages, la transposition, aux données recueillies par le procédé décrit, de la méthode de DE VRIES permet de caractériser les divers herbages par une « valeur pastorale » synthétique. Sur le plan pratique, ces résultats peuvent permettre de dresser, par région étudiée, des diagrammes fourragers et de déduire un spectre fourrager optimal, ainsi qu'une valeur pastorale optimale.

Le rapport entre la valeur pastorale actuelle et la valeur optimale exprime l'intensité de l'utilisation de l'aire sur laquelle portent les observations (station écologique, parcelle agricole, exploitation, zone-test).

## INTRODUCTION

La traduction dans le langage agronomique des observations et des résultats issus des recensements phytoécologiques réalisés par le C. E. P. E., ces dernières années, dans les prairies de diverses régions naturelles de France, est apparue comme une nécessité pour la valorisation des recherches entreprises. Déjà, nous avons été amenés à présenter un certain nombre de résultats préliminaires (DAGET, 1968,

1970 ; DAGET et J. POISSONET, 1965 *a*, *b*, *c*, 1966, 1969 *a* et *b*, 1970 *a* et *b* ; GODRON *et al.*, 1967 ; GOUNOT, 1969 ; J. POISSONET, 1965, 1966, 1968 ; P. POISSONET, 1969 ; P. et J. POISSONET, 1969) ; le moment nous paraît venu d'exposer les principes généraux de la méthode proposée et quelques normes d'interprétation qui en découlent.

Cet exposé ne prétend pas couvrir l'ensemble de l'étude des prairies ; bien que nous ne sous-estimions pas l'importance de l'étude de la biologie et de l'autécologie des espèces, nous ne nous sommes situés qu'au niveau de la synécologie, et, même à ce niveau, nous n'avons abordé qu'une partie des problèmes qui peuvent être posés.

Si la méthode de recensement présente certains caractères originaux, par contre, l'interprétation pratique des observations s'inspire des conceptions de l'École hollandaise de D. M. DE VRIES.

En l'état actuel de notre expérience, l'exposé des principes généraux et des résultats présentés dans ce mémoire, ne s'applique qu'aux formations herbacées denses (1) (prairies s. l.).

## A. — RAPPEL DES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

Le recensement des observations peut se pratiquer soit au niveau de la parcelle cadastrale, soit au niveau de la « parcelle écologique », c'est-à-dire de la station (2).

Dans le premier cas, le prospecteur s'attache surtout à l'homogénéité des facteurs d'exploitation ou de production de l'herbage qui sont généralement uniformes sur l'ensemble d'une parcelle cadastrale donnée.

Dans le second cas, le prospecteur attache une importance égale aux facteurs de production et à l'homogénéité des facteurs phyto-écologiques, homogénéité qui n'est réalisée qu'au niveau de la station ; celle-ci peut être identique à la parcelle cadastrale, mais la plupart du temps s'en distingue par des caractères différentiels très nets, une parcelle cadastrale peut être subdivisée en plusieurs stations qui réclament, de ce fait, une analyse distincte.

C'est cette seconde approche qui a été retenue.

La méthode proposée comprend *deux phases* d'exécution sur le terrain :

— le relevé de la végétation et du milieu ;

— l'étude de points-quadrats.

### 1. — *Le relevé de la végétation et du milieu*

La méthode est basée sur le recensement objectif des observations à l'aide de formulaires précodés. Elle a fait l'objet d'une récente mise au point (GODRON *et al.*,

(1) Les formations herbacées denses comprennent moins de 25 p. 100 de végétaux ligneux hauts, moins de 10 p. 100 de végétaux ligneux bas, moins de 10 p. 100 de sol nu et 90 à 100 p. 100 de couvert herbacé (cf. *Code écologique*, GODRON *et al.*, 1968, pp. 32-37).

(2) La station est une portion de territoire d'étendue quelconque — le plus souvent restreinte — dans laquelle les conditions écologiques sont homogènes ; elle est caractérisée par une végétation uniforme (PAVILLARD, 1935 ; GODRON *et al.*, 1968).

1962, 1968) et de nombreuses présentations (GOUNOT, 1958 ; GODRON *et al.*, 1964, 1968 ; DAGET et J. POISSONET, 1965, 1966...) ce qui nous dispense d'en donner ici des développements détaillés.

Le relevé comprend une analyse phytosociologique de la végétation (composition floristique, structure,...) et une étude des variables écologiques stationnelles (topographie, influences climatiques locales, facteurs édaphiques et biotiques). L'ensemble de ces données permet d'apprécier, au niveau stationnel, les variables prépondérantes du milieu qui sont susceptibles d'intervenir sur la composition floristique et la biomasse d'une phytocénose, critères dont dépendent étroitement les potentialités agronomiques et économiques.

La comparaison de nombreux relevés stationnels permet la caractérisation des écosystèmes au niveau de la production primaire (BOURLIÈRE et LAMOTTE, 1967), entre autres par la mise en évidence de « groupes écologiques » (GOUNOT, 1958 1960, 1961, 1969 ; DELPECH, 1962 *b* ; GODRON *et al.*, 1964 ; DAGET et J. POISSONET, 1965 *a*, 1966).

### 2. — *Le relevé de points-quadrats*

Le relevé, tel qu'il vient d'être présenté n'est pas suffisamment précis sur le plan quantitatif, notamment en ce qui concerne l'estimation de l'abondance des espèces et de leur recouvrement. En effet, cette estimation présente de nombreuses difficultés d'exécution :

— difficulté d'identifier, d'isoler et de regrouper les individus de la même espèce, en raison de l'enchevêtrement des organes végétatifs des diverses espèces de la communauté ;

— difficulté de distinguer des strates verticales qui, dans les herbages, peuvent être en très grand nombre ;

— difficulté d'évaluer le recouvrement des espèces de petite taille, qui sont généralement masquées par les espèces de grande taille ;

— difficulté de distinguer physionomiquement des portions d'organes végétatifs ayant la même couleur et le même aspect, mais appartenant à des espèces différentes ; ce qui conduit, corrélativement, à la tendance de sur-estimer les espèces particulièrement remarquables (couleurs vives, organes volumineux ou attractifs).

Il est donc nécessaire de recourir à un processus de mesure dont la qualité principale soit la fidélité et qui permette d'évaluer les fréquences de toutes les espèces recensées (DE VRIES, 1937, 1938). Par souci de rigueur, nous avons adopté la méthode des points quadrats.

Les techniques généralement utilisées font appel à des dispositifs plus ou moins encombrants : aiguilles montées sur châssis, cadres métalliques avec réseau de fils (voir à ce sujet une abondante bibliographie dans HÉDIN et LEFEBVRE (1951), LAMBERT (1963), P. et J. POISSONET (1969)). Nous avons préféré employer un dispositif très simple qui consiste à disposer à la surface du sol un double-mètre métallique, le long duquel 50 points sont observés, un tous les quatre centimètres ; dans chaque station recensée, deux séries de mesures sont faites, de manière à échantillonner 100 points.

La mise en place du double-mètre est effectuée de la manière suivante :

Le double-mètre, complètement déployé, est glissé à la surface du sol, à travers

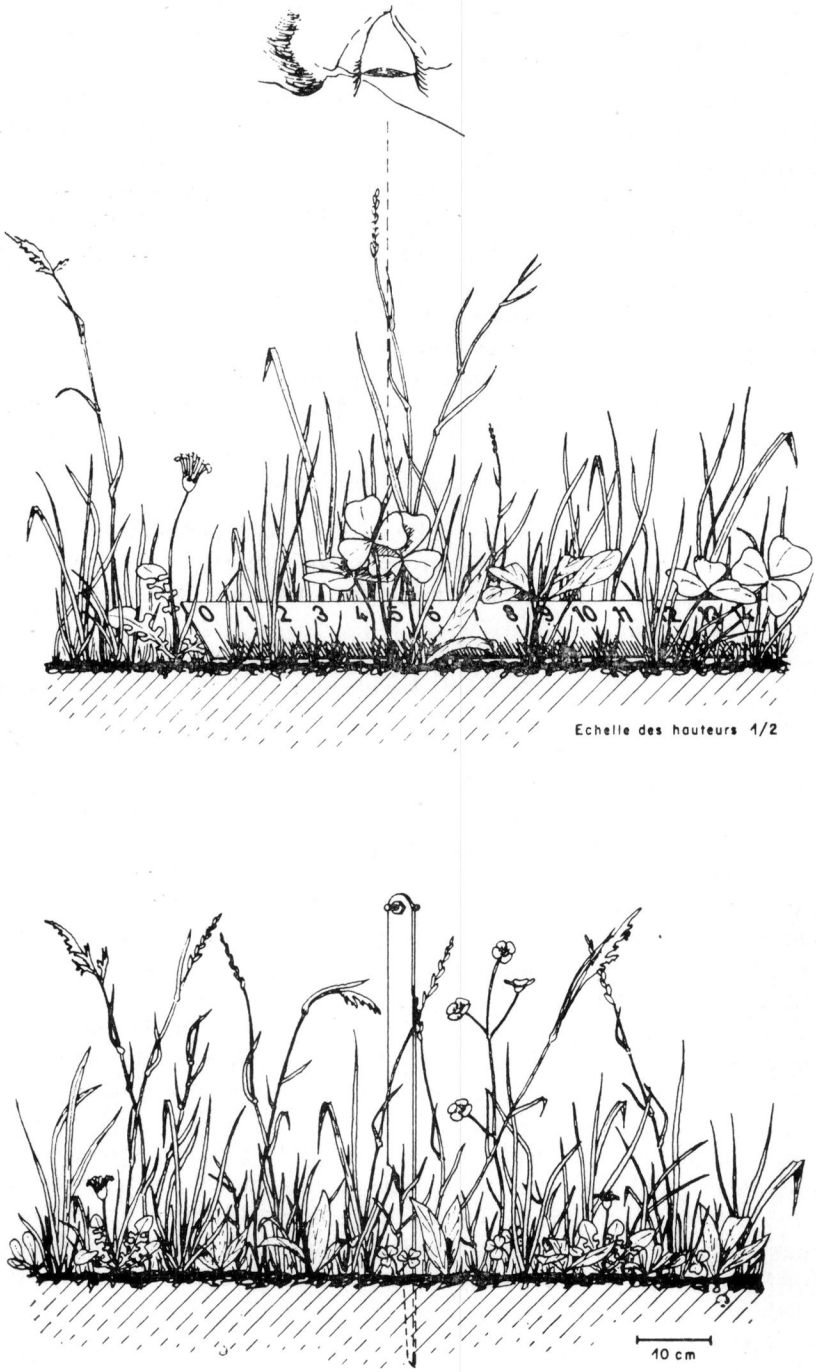



FIG. 1. — *Le matériel utilisé*
Méthode du double-mètre pour les herbages ras (haut de page)
Méthode de la baïonnette pour les herbages hauts (bas de page)

la végétation, la tranche graduée étant perpendiculaire à cette surface ; lorsqu'il est complètement engagé dans l'herbe, il est rabattu en position parallèle à la surface du sol, afin que les graduations en soient aussi rapprochées que possible (fig. 1).

Les lectures sont faites sur le bord gradué, aux intervalles choisis ; l'observateur *vise* perpendiculairement à la surface du sol la graduation retenue et annonce toutes les espèces qui sont situées à la *verticale* de ce point ; il doit s'efforcer de garder sa ligne de visée, afin que les unités d'observation puissent être assimilées à des points.

Par convention, chaque espèce n'est recensée qu'*une fois par point*, c'est-à-dire sur chaque ligne de visée, même si elle s'y trouve plusieurs fois, par exemple en position haute (couronne) et en position basse (souche).

Les observations sont directement notées sur des formulaires préparés à cet effet ; une fois remplis, ces formulaires servent de bordereaux et peuvent être donnés directement à une perforeuse lorsqu'une exploitation mécanographique est prévue.

La méthode utilisée combine les avantages des points quadrats classiques (Bruce-Lévy, 1927 ; Lévy et Madden, 1933 ; Brown, 1954 ; Cain et Castro, 1959) et des méthodes linéaires d'observation de la végétation (Canfield, 1941 ; Parker, 1951 ; Long, 1957 ; Godron, 1966). Kershaw (1957, 1958) effectuait déjà des lectures le long d'une ligne, comme nous proposons de le faire, mais il les faisait tous les centimètres ; Bruce-Lévy (1927) faisait ses observations tous les 2,5 cm. L'expérience a montré que, dans les formations herbacées denses, il faut écarter les strates supérieures de la végétation, après avoir reconnu les espèces qui les constituent, pour pouvoir examiner les strates inférieures ; cette opération doit être faite délicatement de la main, mais il n'est pas possible d'opérer sans déplacer la végétation dans un voisinage de un ou deux centimètres autour du point étudié. C'est pourquoi il fallait au moins une distance de 3 cm entre chaque point ; pour faciliter les calculs ultérieurs, les lectures sont faites tous les quatre centimètres de façon à avoir 50 observations sur un double-mètre.

Lorsque la végétation est assez haute (à partir de 25 cm par exemple), notamment dans les prés de fauche, ces points seraient encore trop rapprochés et la « couche de végétation » trop épaisse pour permettre de faire de bonnes lectures ; nous proposons alors d'effectuer les lectures en des points espacés de 20 cm. Les mesures sont faites sur 5 lignes de 4 m de longueur disposées parallèlement, en position aussi centrale que possible dans la station. En chaque point est plantée verticalement une lame métallique présentant une tranche affûtée : la *baïonnette* ; les lectures sont faites le long du fil de cette baïonnette (fig. 1).

Dans les herbages analysés jusqu'à ce jour par cette méthode (environ 300 stations), le nombre d'espèces notées en chaque point varie de 0 à 13 ; en première approximation, il est d'autant plus élevé que l'exploitation de l'herbage est plus extensive.

La figure 2 présente les courbes de fréquence du nombre d'espèces par point, établies dans deux cas extrêmes, un herbage très extensif (fig. 2 *a*) et une prairie artificielle (fig. 2 *b*) : dans le premier la moyenne est $3{,}94 \pm 0{,}27$, soit approximativement 4 espèces par point, et dans le second $1{,}52 \pm 0{,}14$, soit 1,5 espèces par point.

Le nombre de présences par point est significativement différent de ce qu'il serait s'il suivait une loi de Poisson : en effet $m/s^2 = 2$ (fig. 2) ; par contre, il n'est pas significativement différent de ce que laisse prévoir une loi de Galton. Il existe une relation simple entre la somme de tous les contacts possibles par

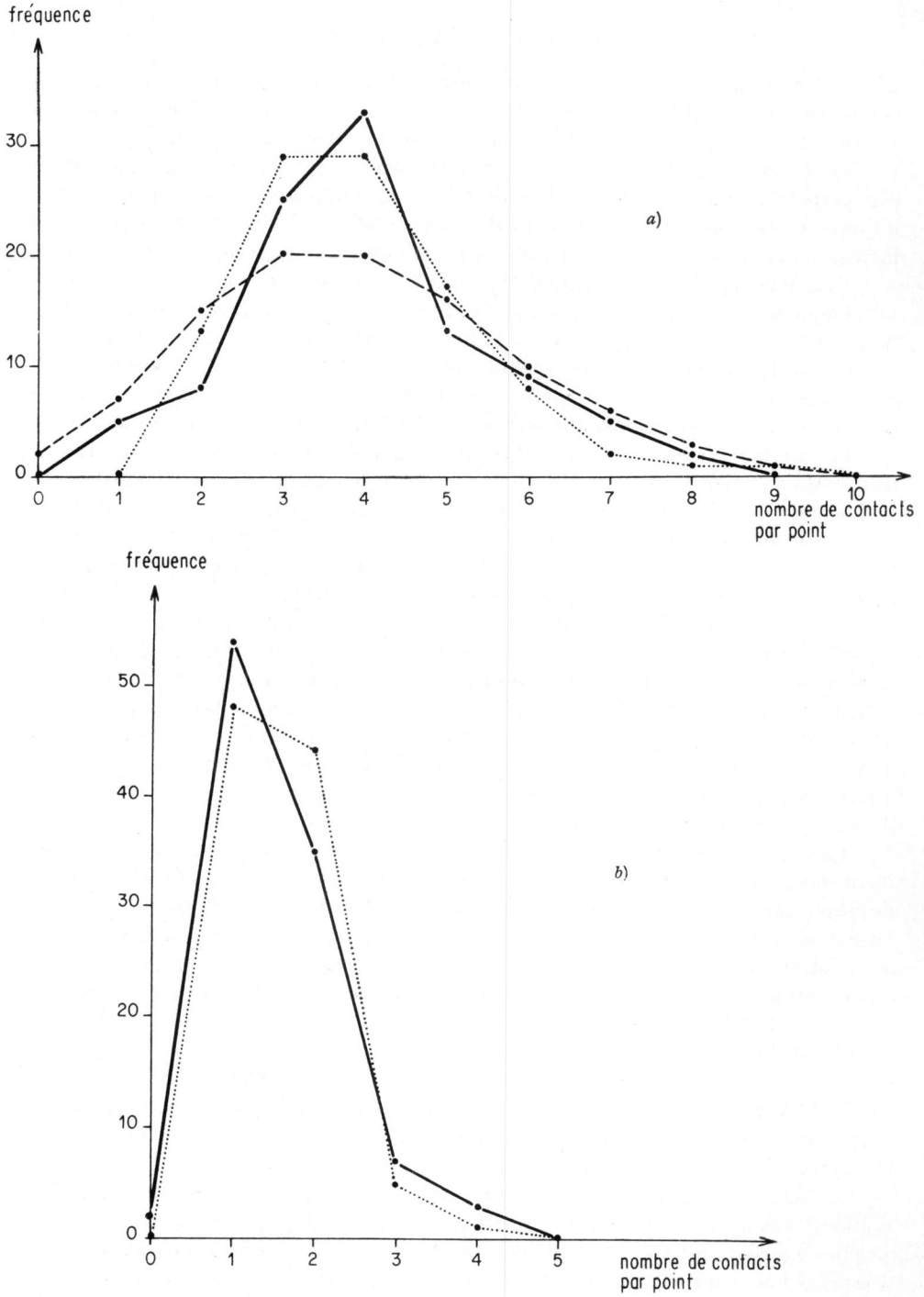



FIG. 2. — *Courbes des fréquences des présences par point*

*a*) Pâturage extensif (Relevé 34.D.67)
- ——— observations
- - - - - - - - ajustement à une loi de Galton
- — — — ajustement à une loi de Poisson

*b*) Prairie artificielle (Relevé 21.P.67)
- ——— observations
- - - - - - - - ajustement à une loi de Galton

espèce et la somme des présences de l'espèce (GODRON *et al.*, 1967 ; P. et J. POISSONET, 1969 ; P. POISSONET, 1969) ainsi qu'entre la somme de tous les contacts possibles à la verticale de chaque point et leur fréquence (GOODALL, 1953).

Comme le remarque DELPECH (1962 *a* et *b*), l'identification des plantes rencontrées est la partie délicate du travail. En effet, il faut déterminer correctement toutes les espèces à tous les stades de leur développement, ou du moins la plus petite unité systématique qui soit morphologiquement discernable (c'est parfois le genre, plus rarement la famille). Il convient donc de procéder aux observations à une époque où la majorité des espèces est suffisamment développée, mais il ne faut pas attendre trop longtemps car un développement excessif gêne la réalisation du travail. De plus, les flores classiques sont souvent d'une aide tout à fait insuffisante pour la détermination des plantes aux stades végétatifs, mais les travaux de certains pastoralistes (KLAPP, 1954, 1958, 1965 ; HUBBARD, 1959 ; KERGUÉLEN, 1960, sd, 1965 ; GARRAUDEAUX, sd ; CAPUTA, 1961 ; KIFFMANN, 1962 ; VOGLER, 1962 ; PFITZENMEYER, sd ; SCHWEIGHART, 1962 ; ACTA, 1964 ; DELPECH et BERTOLETTI, 1968 ; KRUIJNE et DE VRIES, 1968) peuvent aider utilement l'observateur en difficulté ; toutefois, c'est surtout l'entraînement qu'il faut acquérir.

La comparaison des diverses méthodes d'observation des herbages effectuée par POISSONET P. et J. (1969) montre que la méthode employée ici donne les résultats les plus proches de ceux qui sont fournis par la méthode de référence ; mais elle montre aussi que la précision des résultats dépend du soin apporté par l'observateur aux lectures ; en particulier, des lectures trop rapides altèrent la valeur des résultats.

## B. — APPLICATION A L'ÉTUDE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES PRAIRIES PERMANENTES

Nous examinerons successivement les problèmes relatifs à la richesse floristique des prairies permanentes et ceux qui concernent l'interprétation des mesures de fréquence.

### 1. — *Richesse floristique*

D'après THURMANN (1849), qui a été repris par la plupart des phytoécologistes (FLAHAUT, 1901 ; PAVILLARD, 1935 ; DE VRIES et KOOPMANS, 1949 ; DELPECH, 1966 ; GODRON, 1966 ; GODRON *et al.*, 1968), la flore d'une étendue de terrain quelconque « est l'énumération de toutes les espèces qui y croissent ; la plante rare n'y occupe pas moins de place que la plante commune ». Cette notion de *flore* est ainsi distinguée de celle de *végétation* dans laquelle « les associations et les proportions des espèces dans le tapis végétal sont prises en considération ». Cela permet donc de dire (GODRON *et al.*, 1968 ; GOUNOT, 1969) que « la végétation associe à la notion de flore un concept de structure qui fait intervenir, par exemple, la distribution horizontale ou l'abondance relative des espèces ».

La notion de *richesse floristique* rend donc compte de la seule diversité de la

flore, c'est-à-dire du nombre de taxons inventoriés ; elle n'implique pas de jugement de valeur sur la production ou la productivité.

Pratiquement, dans les conditions climatiques de la France, la liste floristique des stations prairiales s'établit habituellement en prospectant une aire échantillon de 16 m² (aire du relevé + extension proche et lointaine, pages 20 et 63 du Code écologique (GODRON *et al.*, 1968)) à l'intérieur de la station homogène. On parlera de :

— flore *très pauvre*, lorsqu'il y a moins de 10 espèces recensées sur 16 m² ;
— flore *pauvre*, lorsqu'il y a de 11 à 20 espèces ;
— flore *moyenne*, lorsqu'il y a de 21 à 30 espèces ;
— flore *assez riche*, lorsqu'il y a de 31 à 40 espèces ;
— flore *riche*, lorsqu'il y a de 41 à 50 espèces ;
— flore *très riche*, lorsqu'il y a plus de 51 espèces.

*Exemples.* Un relevé, n° 37.D.67/CEPE, effectué dans l'ouest du Cantal a permis de recenser 59 espèces sur 16 m² ; la flore de cet herbage est donc très riche.

L'étude préliminaire de 76 prairies permanentes du Massif central, couvrant toute la gamme des types d'exploitation, a montré que les stations se répartissaient de la manière suivante :

Aucune station n'a une flore très pauvre,
3 stations ont une flore pauvre,
19 stations ont une flore moyenne,
24 stations ont une flore assez riche,
25 stations ont une flore riche,
5 stations ont une flore très riche.

Les différences entre les richesses moyennes des flores prairiales des régions naturelles sont significatives (au seuil de 95 p. 100) :

| | |
|---|---|
| Cantal-ouest (plateaux).... | 44 ± 2 espèces (riche) |
| Basse-Margeride ..... | 37 ± 2 espèces (assez riche) |
| Haute-Margeride..... | 31 ± 2 espèces (assez riche) |

Dans une région naturelle donnée, la richesse floristique est en liaison avec les facteurs du milieu ; c'est ainsi qu'il y a, en général, plus d'espèces dans les prés de fauche que dans les prés de pâturage, et plus d'espèces dans les stations sans fumure organique, ni fertilisation minérale, que dans celles qui en reçoivent ; ces observations sont conformes à celles de nombreux pastoralistes (DELPECH, 1960 ; DE VRIES et KRUIJNES, 1960).

Dans la pratique, l'aire analysée est prospectée par portions de surfaces croissantes ; d'abord 1 m², puis 2 et 4 m², de même pour les extensions, 8 m², puis 16 et 32 m². La connaissance du nombre d'espèces apparues à chaque augmentation d'aire permet d'établir une courbe « aire-espèce », courbe qui, même si son interprétation n'est pas encore bien au point, permet de juger de l'homogénéité de la station.

*Exemple.* Dans le relevé précédemment cité, les espèces sont apparues de la manière suivante :

| | |
|---|---|
| premier mètre carré ..... | 43 espèces |
| second mètre carré..... | 5 espèces |
| troisième et quatrième ..... | 1 espèce |
| extension proche (+ 4 m²) ..... | 3 espèces |
| extension lointaine (+ 8 m²)..... | 4 espèces |
| de 16 à 32 m² ..... | 2 espèces |
| au-delà des 32 m² ..... | 1 espèce |

Ceci permet d'établir la courbe « aire-espèce » ; c'est ce qui a été fait sur la figure 3, où elle est présentée sous trois formes :

— la forme classique, en coordonnées arithmétiques (*a*),
— en coordonnées semi-logarithmiques (*b*), ce qui donne un bon ajustement linéaire,
— en coordonnées logarithmiques (*c*), ce qui donne un ajustement linéaire encore meilleur, et permet de dire que dans le domaine étudié, la courbe « aire-espèce » a pour équation :

$$y = 42(x)^{0,098}$$

où $y$ est le nombre d'espèces et $x$ la surface inventoriée en m².

La régularité des courbes obtenues indique que le relevé a été effectué dans une zone floristiquement homogène et, par conséquent, que les relations facteurs-espèces qu'il pourra contribuer à mettre en évidence auront une signification concrète (GOUNOT, 1961).

### 2. — *Fréquences et contributions spécifiques*

a) *Nombre et fréquence des espèces rencontrées sur 100 points.*

Parmi les espèces présentes dans la station, un certain nombre sont notées une ou plusieurs fois lors de la lecture des 100 points des doubles-mètres.

*Exemple :* L'étude de 55 stations, situées dans la Margeride et le Cantal, a montré que cet échantillonnage de 100 points permettait de recenser environ les 2/3 (0,63 ± 0,05) des espèces présentes dans le relevé. Dans le relevé pris ici comme exemple, 40 espèces sur 59 ont été trouvées sous les points, soit 67,7 p. 100 de la liste floristique de la station.

On appelle « *fréquence spécifique* », FS, d'une espèce, le nombre de points où cette espèce a été rencontrée ; c'est donc une fréquence absolue (LAMOTTE, 1962 ; GODRON, 1968). Lors de l'inventaire d'une station, l'effectif total de l'échantillon est de 100 points, la valeur de FS peut être considérée comme un pourcentage et FS comme une fréquence relative (LAMOTTE, 1962 ; GODRON, 1968) ; nous l'appellerons *fréquence centésimale* pour la distinguer d'une autre fréquence relative qui sera vue ultérieurement. Dans un essai agronomique, où de nombreux points sont observés, la valeur de la fréquence centésimale n'est plus égale à FS, mais au rapport de FS sur le nombre de points ; cette notion est donc homologue à la « fréquence » de RAUNKIAER (PAVILLARD, 1935 ; HÉDIN, 1945 ; GREIG-SMITH, 1964). La « *proba-*

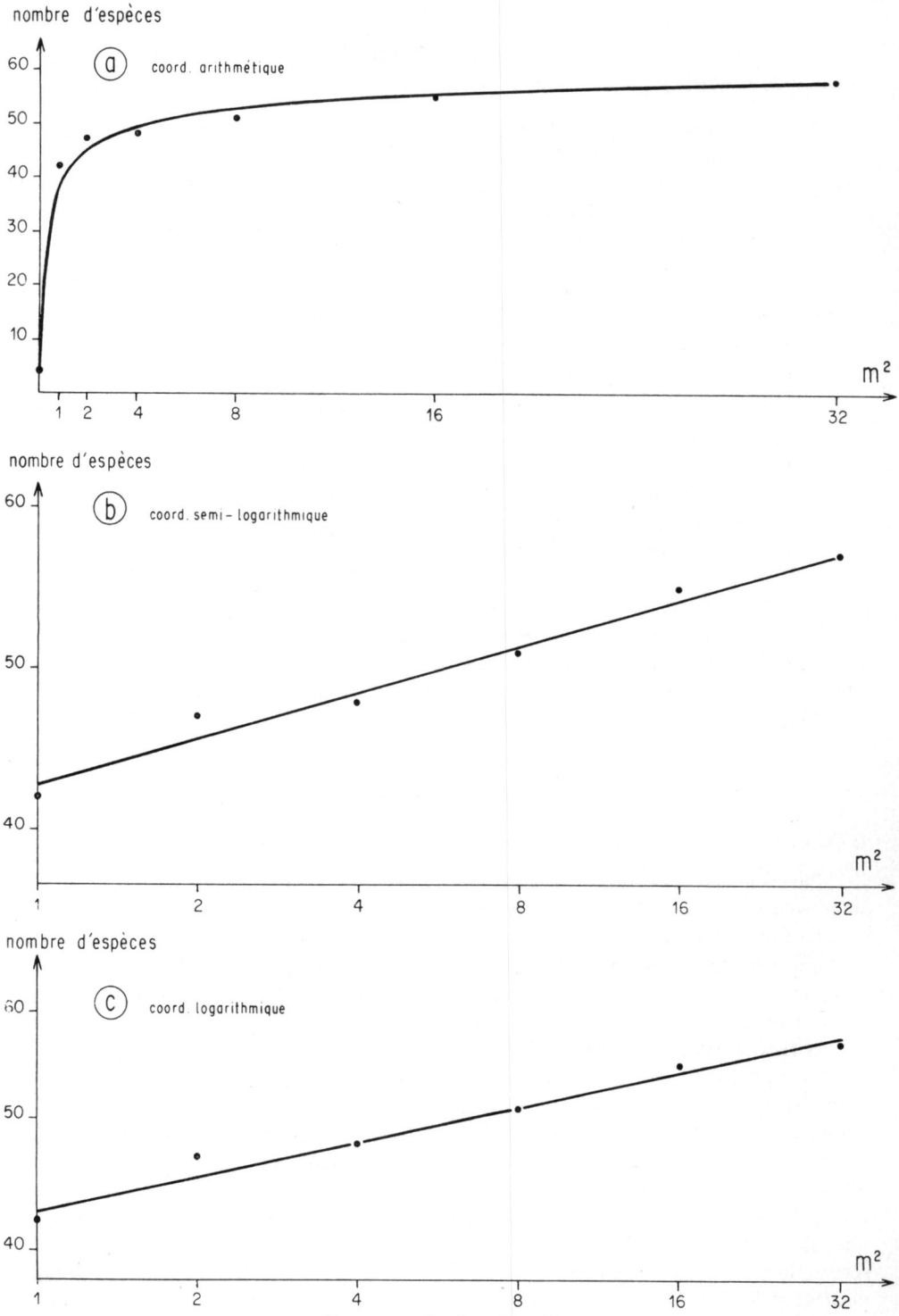



FIG. 3. — *Courbes aire-espèce*

*bilité de présence* » est la limite vers laquelle tend la fréquence centésimale lorsque le nombre de points devient très grand.

*Exemple :* L'espèce *Agrostis vulgaris* (1) a été rencontrée 44 fois sur 100 points recensés dans la station du relevé 38.D.67, sa fréquence spécifique est de 44, sa fréquence centésimale de 44 p. 100. Dans un essai effectué sur une prairie de la Mayenne, 2 400 points ont été observés ; *Trifolium repens* ayant été rencontré 1 058 fois, sa fréquence spécifique est 1 058 et sa fréquence centésimale

$$\frac{1\,058}{2\,400} \times 100 = 44 \text{ p. } 100.$$

Il est normal de considérer que les visées effectuées avec le double-mètre, comme les observations faites le long du fil de la baïonnette, ont des dimensions négligeables (DAGET et POISSONET, 1965 *a*, 1969 *a* ; P. et J. POISSONET, 1969). La probabilité de présence est alors un synonyme du recouvrement (GREIG-SMITH, 1964 ; GODRON, 1968).

*Exemple :* L'interprétation de l'ensemble des données recueillies dans cette station montre que le nombre moyen d'espèces par point est de 4. L'extrapolation de la courbe aire-espèce, dans la mesure où elle est justifiée, ferait correspondre à ce nombre une surface nettement inférieure au millimètre carré.
On peut par conséquent estimer que le recouvrement d'*Agrostis vulgaris* est de 44 p. 100, comme celui du Trèfle de la Mayenne.

La consultation de l'abaque du tableau 41 des *Biometrika tables* de PEARSON et HAETLEY permet de connaître l'intervalle de confiance des fréquences spécifiques calculées ; il montre que, plus le nombre d'observations est élevé, plus l'intervalle de confiance de la fréquence centésimale obtenue est réduit et, donc, plus elle est sûre. Cela souligne l'intérêt de procéder à un nombre d'observations suffisamment grand.

*Exemple :* Dans les deux exemples précédents, pour la fréquence centésimale de 44 on lit une fourchette :
- pour *Agrostis vulgaris*, avec 100 lectures, de 34,5 à 54 ;
- et pour *Trifolium repens*, avec 2 400 lectures, de 42 à 46 ;

si le nombre de lectures était réduit à 33 on aurait eu un intervalle de confiance défini par la fourchette 24-59.

Une étude théorique, appuyée sur l'analyse de très nombreuses séries de points effectuées dans la même station, a montré (DAGET, 1968 ; DAGET et J. POISSONET, 1970 *a*) que les fréquences spécifiques se répartissent selon une loi log-normale, dont il est possible d'évaluer les paramètres.

*Exemple :* Le détail des calculs pour le relevé n° 37.D.67/CEPE, qui a été pris ici comme exemple, est donné dans le tableau ci-dessous.

A l'occasion d'une modification des conditions de milieu, certaines espèces voient leur fréquence croître ; pour d'autres, elle décroît. Ces modifications se traduisent par l'apparition de courbes bi-modales, qui peuvent être considérées comme

(1) La nomenclature botanique employée est celle de la flore de P. FOURNIER (1961).

la somme de deux courbes log-normales (DAGET et J. POISSONET, 1970). Progressivement, et d'autant plus rapidement que la modification du milieu a été plus forte, les espèces dominées disparaissent, et l'on retrouve un état d'équilibre qui peut être traduit, comme l'était l'état d'équilibre initial, par une courbe log-normale simple.

| Classes de fréquences spécifiques | Nombre d'espèces | Fréquences relatives cumulées |
|---|---|---|
| 1 | 4 | 10,00 |
| 2 | 6,5 | 26,25 |
| 2-4 | 6,5 | 42,50 |
| 4-8 | 7,5 | 61,25 |
| 8-16 | 7,5 | 80,00 |
| 16-32 | 6 | 95,00 |
| 32-64 | 2 | 100 |

b) *Contribution spécifique.*

La « *contribution spécifique* », CS, est définie comme le rapport de la fréquence spécifique FS à la somme des fréquences spécifiques de toutes les espèces recensées sur 100 points échantillonnés.

$$CS_i = \frac{FS_i}{\sum_{i=1}^{n} FS_i} \times 100$$

où $CS_i$ et $FS_i$ sont les contributions et fréquences de l'espèce $i$ et $n$ le nombre d'espèces. $CS_i$ est la fréquence relative de l'espèce $i$ dans l'ensemble des fréquences spécifiques observées.

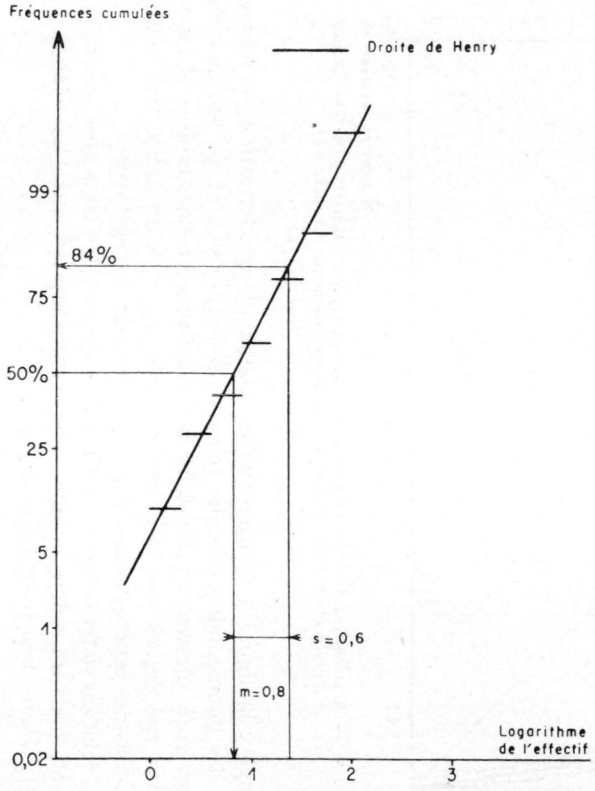
*Exemple :* Considérons les mesures présentées dans le relevé précédent, la fréquence centésimale FS de *Potentilla tormentilla* est de 30 p. 100 ; la somme des fréquences spécifiques du relevé est de 396, ce qui signifie que sur les 100 points échantillonnés, 396 présences d'espèces ont été observées.
La contribution spécifique CS de la Potentille est 7,6 p. 100 (30/396 × 100). (Les diverses contributions spécifiques de ce relevé sont données à l'Annexe II.)

A partir de la somme des fréquences spécifiques, l'intervalle de confiance du pourcentage réel se déduit immédiatement de la consultation de l'abaque cité plus haut.

*Exemple :* Dans le relevé cité, la CS d'*Agrostis vulgaris* est de 44/396 × 100 = 11,1 p. 100 ; le pourcentage réel est compris entre 8 et 14,5 p. 100 à la probabilité de 0,95.

Les études effectuées dans la Margeride et le Cantal ont montré que, dans une communauté prairiale, les espèces dont la contribution spécifique arrondie à l'unité la plus proche est au moins égale à 1 p. 100, représentent environ la moitié (52 ± 5 p. 100) du nombre total d'espèces de l'aire inventoriée.

*Exemple :* Dans le relevé étudié, le nombre d'espèces ayant une CS au moins égale à 1 p. 100 est de 33 sur 59 espèces en tout, soit 55,9 p. 100.




*a) Appréciation graphique des caractéristiques de la distribution des fréquences spécifiques dans le relevé de l'Annexe II.*

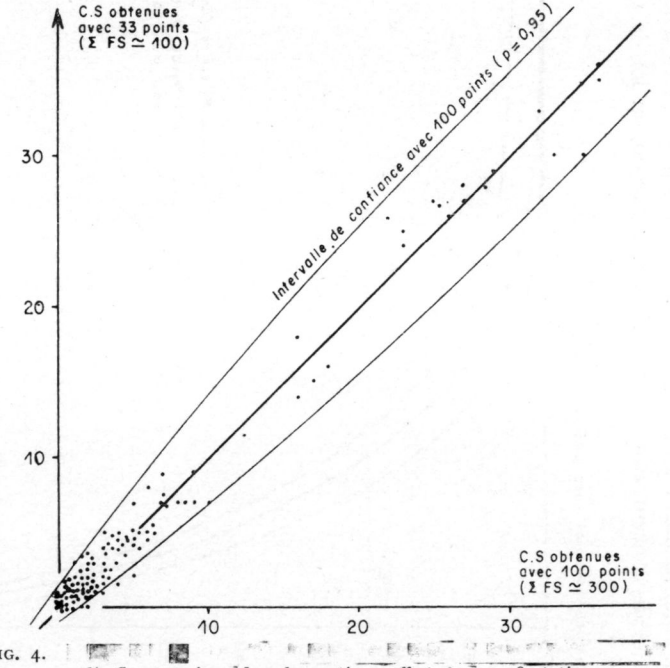



FIG. 4.

*b) Comparaison des observations effectuées sur 8 stations avec 100 et 33 points*

Une étude théorique montre (JACQUARD *et al.*, 1968 ; J. POISSONET, 1968 ; P. et J. POISSONET, 1969) qu'il existe une relation entre le pourcentage des espèces composant la communauté et les contributions spécifiques ; cette relation est assimilable à une loi de concentration de caractéristique 20/80, ou loi de Gini-Lorenz (fig. 5).

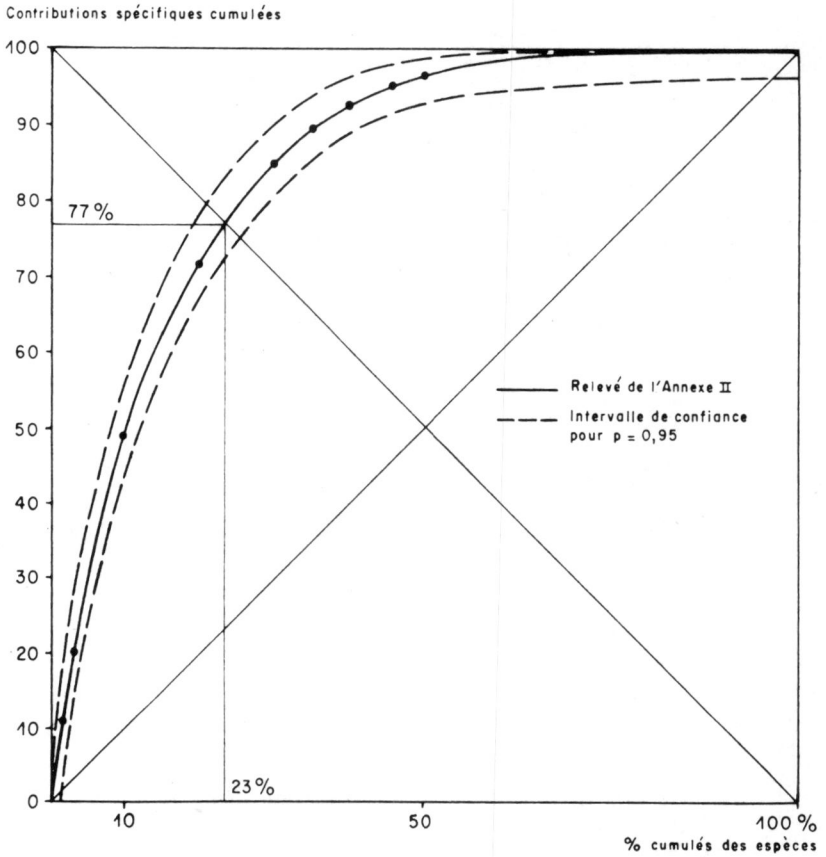



FIG. 5. — *Relation entre les pourcentages cumulés des espèces recensées dans une station et leurs contributions spécifiques cumulées (relevé de l'Annexe II).*

*Exemple :* la figure 5 montre que la relation de concentration, ou d'inégalité, entre les pourcentages cumulés (c'est-à-dire expression en p. 100 du rang des espèces après classement par ordre de CS décroissante) des espèces et les contributions spécifiques cumulées est de type 23/77, c'est-à-dire que seulement 23 p. 100 des espèces constituent 77 p. 100 de la végétation.
Cette relation déterminée à partir d'une somme de fréquences spécifiques de 396 est, pour un même nombre d'espèces, comprise entre les relations 20/80 et 25/75, avec une probabilité de 0,95.

Une comparaison effectuée sur 8 stations du Cantal entre les contributions spécifiques obtenues avec 100 points et celles qui peuvent être obtenues avec 33 points en prenant un point sur 3 (ce qui revient à prendre une distance de 12 cm entre

deux points successifs) permet de mettre en évidence (fig. 4 *b*) que les CS supérieures à 5 p. 100 obtenues avec 33 points sont toutes comprises dans l'intervalle de confiance (P = 0,95) des CS obtenues avec 100 points ; en dessous de 5 p. 100, il n'y a que 5 points du graphique sur 83 (soit 6 p. 100) qui présentent un écart significatif, ce qui est négligeable.

Sur le plan pratique, il est donc possible de se contenter de l'observation de 33 points ; mais l'examen de l'abaque cité plus haut montre que la précision des résultats est moindre (cela souligne *le soin* qu'il convient d'apporter aux observations). On ne fera donc cette réduction qu'avec la plus grande prudence, surtout pour les études à objectifs limités.

c) *Signification de la contribution spécifique.*

Les travaux de P. et J. POISSONET (1969) ont montré qu'il existe une relation presque linéaire (inégalité 46/54) entre ce que l'auteur appelle « Contribution spécifique présence » (CSP), que nous dénommons plus brièvement ici « contribution spécifique » : CS et la « contribution spécifique contacts » (calculée de la même façon, mais en tenant compte de tous les contacts de la même espèce sur chaque verticale d'observation) ; or, il existe une relation strictement linéaire entre cette dernière valeur et le poids de matière sèche exprimée en p. 100, relation qui, le plus souvent, est du type Y = X.

La contribution spécifique peut donc être considérée, à une certaine approximation près, comme une expression relative de la biomasse ; un abaque est fourni par ces auteurs pour effectuer la transformation. Cette liaison est à rapprocher de la corrélation linéaire entre recouvrement et production, mise en évidence par PRESCENVY (1957).

*Exemple* : Dire que, dans la station considérée, la Potentille a une contribution spécifique de 7,6 p. 100, cela revient à dire qu'elle constitue 8 p. 100 de la biomasse de cet herbage, à peu de chose près. Dire que 23 p. 100 des espèces de la station ont une contribution globale de 77 p. 100, cela revient à dire que ces espèces constituent environ 77 p. 100 de la biomasse de l'herbage ; plus précisément, compte tenu de la liaison exacte (de type 46/54), elles en représentent 82 p. 100 ; l'erreur relative est de 6 p. 100. Par le type même de liaison, cette erreur diminue vers les CS fortes.

La notion de contribution spécifique est très utile pour exprimer les similitudes floristiques quantitatives de deux ou plusieurs relevés. Ainsi, la somme des contributions spécifiques des espèces communes de relevés pris deux à deux permet de les comparer quantitativement, alors que les coefficients de similitude de JACQUARD et de SÖRENSEN ne permettent de faire qu'une comparaison qualitative entre relevés (DAGET et J. POISSONET, 1965 *a*).

d) *Quelques définitions.*

Parmi les espèces rencontrées sur les 100 points, certaines contribuent de façon appréciable à la production totale de biomasse, c'est-à-dire à la production d'herbe ; ce sont toutes les espèces dont la contribution spécifique est au moins égale à 1 p. 100 ; elles sont appelées *espèces productrices*.

Parmi les espèces productrices, les unes produisent la majeure partie de la bio-

masse ; ce sont celles dont la contribution spécifique est au moins égale à 4 ± 1 p. 100, elles sont appelées « *espèces très productrices* ». Les espèces dont la contribution est comprise entre 1 et 4 ± 1 p. 100 sont appelées « *espèces peu productrices* ». Celles qui restent, dont la CS est inférieure à 1 p. 100, sont dites « *espèces non productrices* »

On appellera, en outre, « *espèces productives* », celles qui, adroitement stimulées, sont capables de donner une très forte production ; ce sont, le plus souvent, les espèces qui ont été choisies par les agro-généticiens pour leurs travaux de sélection et d'amélioration (le Trèfle blanc, le Trèfle violet, la Luzerne sont des exemples parmi les Légumineuses ; le Ray-grass, le Dactyle, la Fléole en sont parmi les Graminées). Les espèces productives — celles qui constituent le potentiel de production de l'herbage — peuvent être en même temps productrices ; cela se rencontre dans les prairies temporaires et artificielles ainsi que dans certaines prairies permanentes ; ce sont des herbages de forte production. Mais, assez souvent dans les prairies permanentes, les espèces productives ne sont, en fait, que peu ou non, productrices ; elles marquent le potentiel latent de l'herbage et suggèrent ses chances d'amélioration rapide ; on parle alors d' « *espèces potentielles* ».

*Exemple* : Dans la station déjà citée (voir tableau récapitulatif *in fine*),

- 12 espèces ont une CS supérieure à 3 p. 100 et constituent 73 p. 100 de la végétation ; ce sont les espèces très productrices ;
- 21 espèces ont une CS comprise entre 1 et 3 p. 100 ; ce sont les espèces peu productrices ; parmi celles-ci, deux espèces potentielles, les deux Trèfles (*Trifolium repens, Trifolium pratense*) ;
- les autres espèces ont une CS inférieure à 1 p. 100 ; ce sont les espèces non productrices.

Les enquêtes effectuées sur les facteurs de production, dans le Cantal et la Margeride, semblent montrer qu'une surexploitation a un effet dépressif sur le nombre d'espèces productrices, alors qu'inversement, une sous-exploitation en augmente le nombre. La fertilisation entraîne notamment une diminution du nombre d'espèces productrices (DELPECH, 1960).

e) *Application à l'expérimentation.*

A l'aide de cette méthode, il est possible d'aborder expérimentalement le problème de l'évolution de la végétation dans les formations herbacées denses.

C'est ainsi qu'on peut suggérer le protocole suivant (JACQUARD *et al.*, 1968 ; DAGET-BERTOLETTI, 1969) :

Une parcelle expérimentale est choisie en raison de son homogénéité floristique et écologique ; elle est divisée en parcelles élémentaires qui sont soumises à des traitements différents et dans lesquelles des observations périodiques sont effectuées (en principe, au début du printemps et dans le courant de l'été). Par ailleurs, des mesures de biomasse sont effectuées : matière verte, matière sèche (globale et par catégories d'espèces).

Ces mesures permettent :

— de suivre les variations du rendement potentiel dans le temps et en liaison avec la composition floristique,

— de préciser la date d'action des traitements appliqués,

— d'exprimer les corrélations entre mesures pondérales et mesures de fréquence.

## C. — APPLICATION A L'ÉTUDE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES PRAIRIES ARTIFICIELLES ET TEMPORAIRES

L'application de la même méthode aux prairies artificielles et temporaires permet de définir un certain nombre de critères numériques permettant de caractériser objectivement l'état de ces formations et qui sont la « *composition floristique fondamentale* » et les « *degrés de salissement et de dégradation* ».

On sait que par « prairie artificielle » il faut entendre : Légumineuses semées pures ou dominantes ; pour les caractériser, nous avons pris comme seuil *moins de 25 p. 100* de Graminées semées. Par « prairie temporaire » il faut entendre : Graminées semées pures ou en mélange avec des Légumineuses ; pour les caractériser, nous avons pris comme seuil *plus de 25 p. 100* de Graminées semées.

### 1. — *Composition floristique fondamentale*

A partir des mesures de fréquence effectuées dans chaque prairie échantillonnée, il est possible de calculer la contribution des Graminées semées, des Légumineuses semées et des diverses plantes spontanées (pour simplifier les calculs, on ajoute la proportion de sol nu sans végétation à cette dernière catégorie) ; par plantes spontanées, on comprendra ici « l'ensemble des plantes qui n'ont pas été semées volontairement par l'homme » ; ce sont donc les adventices au sens agronomique usuel et au sens grammatical de Littré ; au sens géobotanique de A. P. DE CANDOLLE, ce sont les « plantes spontanées et les plantes cultivées involontairement » (AYMONIN, 1966).

Les pourcentages des trois catégories retenues : Légumineuses semées, Graminées semées et plantes spontanées diverses (plus sol nu) peuvent être reportés sur un diagramme triangulaire tel que celui de la figure 6 ; nous proposons de délimiter 7 zones dans l'aire d'un tel triangle, correspondant à 7 formations prairiales :

— une *zone I*, correspondant aux *très bonnes* et aux *bonnes prairies artificielles* constituées de 75 à 100 p. 100 de Légumineuses semées et présentant moins de 25 p. 100 de plantes spontanées diverses ;

— une *zone II*, correspondant aux *assez bonnes prairies artificielles*, constituées de 25 à 75 p. 100 de Légumineuses semées, et ayant moins de 25 p. 100 de Graminées semées et moins de 50 p. 100 de plantes spontanées diverses ;

— une *zone III*, correspondant aux *très bonnes* et aux *bonnes prairies temporaires*, constituées de 25 à 100 p. 100 de Graminées semées, moins de 75 p. 100 de Légumineuses semées et moins de 25 p. 100 de plantes spontanées diverses ;

— une *zone IV*, correspondant aux *assez bonnes prairies temporaires*, constituées de 25 à 75 p. 100 de Graminées semées, moins de 50 p. 100 de Légumineuses semées et entre 25 et 50 p. 100 de plantes spontanées diverses ;

— une *zone V*, correspondant aux *prairies temporaires dégradées*, constituées de 25 à 50 p. 100 de Graminées semées, moins de 25 p. 100 de Légumineuses semées et ayant entre 50 et 75 p. 100 de plantes spontanées diverses ;

— une *zone VI*, correspondant aux *prairies artificielles dégradées* constituées

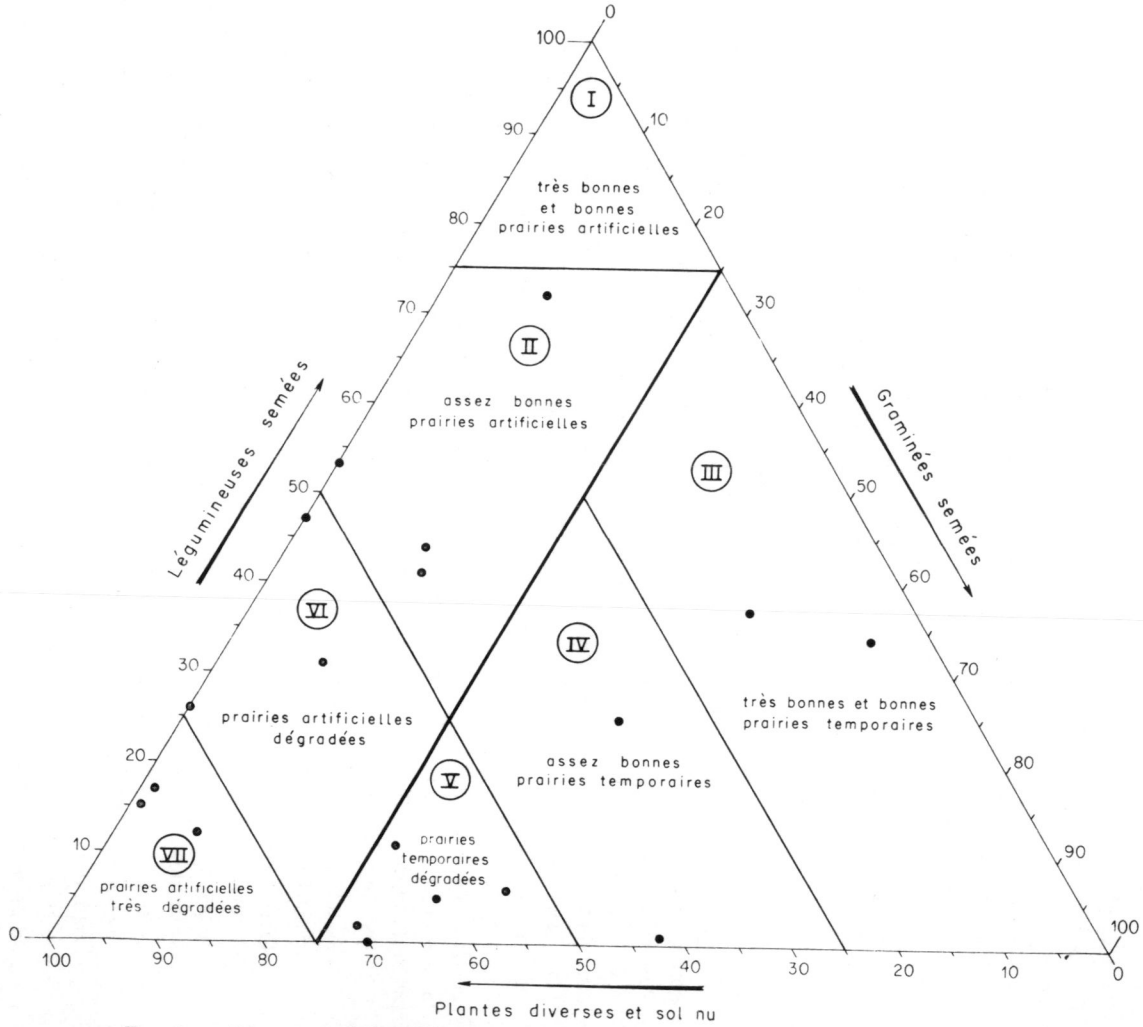



FIG. 6. — *Diagramme de la composition floristique,* (Graminées, Légumineuses, Plantes diverses) *des prairies artificielles et temporaires*

de moins de 50 p. 100 de Légumineuses semées, moins de 25 p. 100 de Graminées semées et ayant entre 50 et 75 p. 100 de plantes spontanées diverses ;

— une *zone VII*, correspondant aux *prairies artificielles très dégradées*, constituées de moins de 25 p. 100 de Graminées semées et de Légumineuses semées et ayant entre 75 et 100 p. 100 de plantes spontanées diverses.

*Exemple :* 19 prairies artificielles et temporaires ont été analysées dans le Massif central ; elles se répartissent de la façon suivante :

| | |
|---|---|
| très bonnes prairies artificielles ..... | 0 |
| assez bonnes prairies artificielles ..... | 4 |
| bonnes prairies temporaires ..... | 2 |
| assez bonnes prairies temporaires ..... | 2 |
| prairies temporaires dégradées ..... | 5 |
| prairies artificielles dégradées ..... | 3 |
| prairies artificielles très dégradées..... | 3 |

Cette répartition est donnée sur la figure 6.

### 2. — *Salissement et dégradation des prairies*

Pour beaucoup d'agronomes et de praticiens, « salissement » et « dégradation » d'une prairie sont des termes équivalents ; nous proposons ici de faire une distinction entre les 2 notions.

a) *Valeur et degré de dégradation des prairies.*

La « *valeur de la prairie* », V, est caractérisée par la somme des contributions spécifiques des espèces semées par l'agriculteur ; elle s'exprime en pourcentage.

Le « *degré de dégradation* », D, de la prairie est exprimé par la somme des contributions spécifiques des espèces adventices, à laquelle est ajoutée la proportion de sol nu ; il s'exprime en pourcentage.

De ces deux définitions, il résulte que :

$$V + D = 100$$

Les prairies pour lesquelles D est compris entre 0 et 25 p. 100 sont considérées comme *peu dégradées*, celles pour lesquelles D est compris entre 25 et 50 p. 100 sont *moyennement dégradées*, entre 50 et 75 p. 100, elles sont *fortement dégradées*, et au-dessus de 75 p. 100, elles sont *très fortement dégradées*.

*Exemple :* Dans les 19 prairies examinées, la dégradation est faible pour 3 d'entre elles, moyenne pour 5, forte pour 7 et très forte pour les 4 dernières.

b) *Degré de salissement des prairies.*

Le « *degré de salissement* », S, des prairies semées est le nombre d'espèces adventices dans la liste floristique complète (16 m²).

Il permet de différencier les prairies de la façon suivante :

— « *propres* », avec moins de 10 espèces adventices,
— « *assez propres* », entre 10 et 20 espèces adventices,
— « *sales* », entre 20 et 30 espèces adventices,
— « *très sales* », avec plus de 30 espèces adventices.

*Exemple :* Dans les 19 prairies examinées, 10 peuvent être considérées comme assez propres, 6 sont sales et 3 sont très sales.

### 3. — *Relation entre degré de salissement et degré de dégradation*

Degrés de salissement et de dégradation sont exprimés tous les deux à partir des adventices de la prairie examinée ; mais le nombre d'espèces adventices peut n'être pas lié à leurs contributions spécifiques ; en effet, il peut y avoir un grand nombre d'espèces adventices différentes représentées chacune par un seul individu ; la somme des contributions spécifiques de ces « mauvaises herbes » sera négligeable. Cela correspond à des herbages sales mais non dégradés. Par contre, dans certains cas une seule adventice pourra avoir une contribution spécifique élevée ; on aura alors un herbage propre mais dégradé.

## D. — DÉTERMINATION DE LA VALEUR PASTORALE DES PRAIRIES PERMANENTES

La connaissance des fréquences spécifiques des diverses espèces d'un ensemble de prairies, c'est-à-dire, à la suite de la discussion du paragraphe B. 1, la connaissance de la végétation d'un ensemble de prairies permet d'aborder une phase de synthèse. Nous avons choisi comme expression synthétique la « *valeur pastorale* » pour les raisons suivantes :

— c'est une forme d'expression qui suppose le préalable de mesures de fréquences spécifiques,

— elle est simple, mais susceptible d'applications pratiques intéressantes,

— enfin, elle a recueilli un consensus international assez large (Andries, 1950, 1954 ; Klapp *et al.*, 1953 ; De Boer, 1954 ; Williams, 1954 ; Areu y Pidal, 1961).

Mais il faut souligner que ce n'est pas la seule voie de synthèse possible ; c'est ainsi qu'à partir des fréquences spécifiques mesurées, on peut établir des groupes écologiques, par exemple par la voie des « profils écologiques » (Guillerm, 1969). Par ailleurs, elle ne donne qu'une indication très indirecte de la production des milieux et de la productivité régionale. Enfin, le caractère d'observation « élaborée » (Godron *et al.*, 1968) de la valeur des espèces, par son aspect relativement subjectif, n'est pas sans choquer certains esprits cartésiens (à tort pensons-nous).

Enfin, il faut souligner que cette synthèse implique la comparaison de relevés, or on ne peut comparer que des choses de même nature. On sait, et l'expérience le montre chaque année, que la structure de la végétation change au cours des saisons ; certaines espèces disparaissent lorsque la saison s'avance, d'autres n'apparaissent qu'en fin de saison ; pour les prés de fauche, les espèces n'ont pas toutes la même capacité à donner un regain (Hédin et Lefebvre, 1951).

C'est ainsi que des espèces *extrêmement fréquentes* au printemps dans le Massif central comme *Crocus vernus* ou *Narcissus pseudonarcissus* et *N. poeticus* n'ont pas été rencontrées dans 200 analyses prairiales effectuées en été.

Il conviendra donc d'effectuer les relevés d'un inventaire d'une année à l'autre pendant le même stade de végétation.

L'étude de la valeur pastorale de la végétation des prairies peut être abordée par deux voies différentes, basées l'une et l'autre sur la connaissance des contributions spécifiques ; la première passe par l'analyse du « spectre de constitution floristique », la seconde par le calcul de la valeur « pastorale ». Ces deux modes, qui se complètent, seront abordés successivement.

## 1. — *Analyse des composantes pastorales principales*

### a) *Spectre de constitution floristique.*

Dans un souci de synthèse, les espèces sont regroupées en grandes catégories, et l'on indique la contribution de chacune d'elles. Selon le type d'étude, on peut utiliser les critères de regroupement tels que types biologiques, unités systématiques, valeur indicatrice, etc. ; pour une étude dont l'objectif est agronomique, les espèces sont réunies d'après leur intérêt pastoral, mais les regroupements peuvent différer selon les auteurs ; certains notent : Graminées/Légumineuses/Divers, d'autres : Graminées/Légumineuses/Ombellifères/Diverses, etc.

Suivant les propositions de DE VRIES (Réf. div.), les catégories suivantes sont retenues :

$G_5$ : très bonnes Graminées (ex. *Lolium perenne*)
$G_4$ : bonnes Graminées (ex. *Arrhenatherum elatius*)
$G_3$ : assez bonnes Graminées (ex. *Agrostis vulgaris*)
$G_2$ : Graminées moyennes (ex. *Festuca rubra*)
$G_1$ : Graminées médiocres (ex. *Anthoxanthum odoratum*)
$G_0$ : Graminées sans valeur (ex. *Holcus mollis*)
$L_4$ : bonnes et très bonnes Légumineuses (ex. *Trifolium pratense*)
$L_3$ : assez bonnes Légumineuses (ex. *Lotus corniculatus*)
$L_2$ : Légumineuses moyennes (ex. *Trifolium campestre*)
$L_1$ : Légumineuses médiocres (ex. *Genista pilosa*)
$L_0$ : Légumineuses sans valeur (ex. *Genista tinctoria*)
$D_f$ : diverses fourragères (ex. *Sanguisorba officinalis*)
$D_n$ : diverses non fourragères (ex. *Luzula campestris*)
R : refus ; cette catégorie comporte :
des refus ligneux (ex. *Calluna vulgaris*)
des refus vulnérants (ex. *Rosa canina*)
des refus toxiques (ex. *Senecio adonidifolius*)
des refus herbacés (ex. *Juncus conglomeratus*)

Certaines Graminées et Légumineuses sont à rattacher à la catégorie des refus, par exemple *Genista anglica* est un refus vulnérant et *Nardus stricta* un refus herbacé.

Il ne faut pas inclure dans les refus les espèces délaissées temporairement, telles que celles qui poussent sur les emplacements de bouses.

DE BOER (1954) et ANDRIES (1950, 1954, 1956) considèrent que la qualité des herbages peut être déterminée à l'aide du spectre de constitution floristique ; ils utilisent les échelles suivantes basées sur la fréquence des très bonnes Graminées ($G_5$) pour les deux premières, sur leur contribution en poids pour la troisième.

| Valeur | Fréquences centésimales | | Contribution pondérale |
|---|---|---|---|
| | De Boer | Andries | Andries |
| Très bonne ..... | 76 et plus | 71 et plus | 51 et plus |
| Bonne ..... | 61 à 75 | 61 à 70 | 31 à 50 |
| Passable ..... | 46 à 60 | 51 à 60 | 16 à 30 |
| Médiocre ..... | 36 à 45 | 31 à 50 | 15 et moins |
| Insuffisante..... | 35 et moins | 21 à 30 | |
| Mauvaise..... | | 20 et moins | |

b) *Diagramme de composition pastorale élémentaire.*

Un premier type de diagramme élémentaire, et rapidement établi, consiste à représenter l'herbage dans un système de coordonnées triangulaires :

— Graminées fourragères ($G_5$ à $_1$),

— Légumineuses et plantes fourragères diverses ($L_4$ à $L_1$ et $D_f$),

— plantes non fourragères, qui peuvent comprendre des Graminées (*Nardus stricta*), des Légumineuses (*Genista anglica*) et des plantes diverses ; ce sont donc des plantes sans intérêt pastoral et des refus.

Les valeurs de ces trois coordonnées s'obtiennent en faisant la somme des CS des espèces de chaque catégorie.

On constate que, dans ce type de représentation, l'on obtient des regroupements ; les images des herbages subissant le même traitement ayant tendance à se placer au voisinage les unes des autres.

*Exemple :* Les images de 56 prairies naturelles étudiées dans le Massif central se groupent en trois zones :

- les prés de fauche non fertilisés et les pâturages,
- les prés de fauche et les prés de pâturage ne recevant qu'une fumure organique,
- les prés de fauche et les prés de pâture recevant une fertilisation complète.

### 2. — *Calcul de la « valeur pastorale » des herbages*

a) *Principes.*

La détermination de la « *valeur pastorale* » de la végétation des herbages (VP), consiste à donner à la prairie un indice global de qualité, tenant compte de sa composition floristique et de la valeur relative des espèces (de Vries *et al.*, 1942 ; de Vries, 1950 ; Klapp *et al.*, 1953 ; Klapp, 1954 ; de Vries et de Boer, 1959 ; Delpech, 1960 ; Kruijne et de Vries, 1963).

La valeur relative des espèces se définit en attribuant à chacune d'elle un *indice de qualité spécifique* ($I_s$) encore appelé « coefficient de valeur », variant de 0 à 5 ; cet indice a été déterminé pour un certain nombre d'espèces, grâce à l'interprétation de nombreuses données : vitesse de croissance, valeur nutritive, appétibilité, saveur, assimilabilité, digestibilité, etc.

b) *Mode de calcul.*

Pour calculer la « valeur pastorale » d'un herbage, on évalue en premier lieu les contributions des diverses espèces, puis elles sont multipliées par les indices spécifiques correspondants ; les valeurs obtenues sont additionnées et exprimées sur 100 :

$$VP = 0{,}2 \sum_{i=1}^{n} CS_i \times Is_i$$

*Exemple :* Le détail des calculs pour le relevé 37.D.67/CEPE qui a été pris ici comme exemple est donné dans le tableau ci-dessous :

| Catégories | Symb. | Indices spécifiques : $I_s$ | CS | $I_s \times CS$ |
|---|---|---|---|---|
| Graminées ..... | G | | | |
| excellentes ..... | 5 | 5 | 0 | 0 |
| bonnes ..... | 4 | 4 | 0 | 0 |
| assez bonnes ..... | 3 | 3 | 14 | 42 |
| moyennes ..... | 2 | 2 | 10 | 20 |
| médiocres ..... | 1 | 1 | 18 | 18 |
| nulles ..... | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Légumineuses ..... | L | | | |
| bonnes ..... | 4 | 4 | 3 | 12 |
| assez bonnes ..... | 3 | 3 | 1 | 3 |
| moyennes ..... | 2 | 2 | 0 | 0 |
| médiocres ..... | 1 | 1 | 0 | 0 |
| nulles ..... | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Diverses fourragères. | $D_f$ | | | |
| assez bonnes ..... | 3 | 3 | 0 | 0 |
| moyennes ..... | 2 | 2 | 1 | 2 |
| Diverses non fourragères ..... | $D_n$ | 0 | 30 | 0 |
| Refus..... | R | 0 | 24 | 0 |
| | | | 100 | 97 |

$$VP = \frac{97}{500} \times 100 = 19{,}4 \quad (500 = 100 \times 5 \text{ valeur maximum})$$

Valeur pastorale : 19/100

c) *Indices de qualité.*

Les travaux de DE VRIES et de ses élèves (nombreuses réf.) ainsi que ceux de KLAPP (AREU Y PIDAL, 1961 ; KLAPP *et al*, 1953 ; KLAPP, 1954) donnent la valeur des indices de qualité d'un certain nombre d'espèces. La flore des herbages de France étant plus riche que celle des herbages des Pays-Bas, il a été nécessaire de compléter la liste par extrapolation, d'une part, à l'aide de la littérature agronomique existante depuis GAIN (1912), jusqu'aux auteurs contemporains et, d'autre part, en se servant des observations que nous avons faites sur le terrain.

Par ailleurs, suivant en cela DELPECH (1960), il nous a semblé préférable de donner des indices de 0 à 5 et non de 0 à 10 comme l'école hollandaise.

Les indices de qualité des Graminées, des Légumineuses et des meilleures plantes diverses ($D_f$) rencontrées dans les prairies naturelles du Massif central (plus de 200 études parcellaires détaillées réalisées) sont données dans l'Annexe I de ce travail.

Les valeurs pastorales calculées à partir des indices de DE VRIES (DE VRIES *et al.*, 1949 ; KRUIJNE et DE VRIES, 1963) et à partir de ceux qui sont donnés dans l'Annexe I sont peu différentes, et le décalage qui peut être observé diminue en même temps que la proportion de plantes diverses non fourragères auxquelles le système de cet auteur accorde une certaine valeur.

*Exemple :* Pour le relevé précédemment cité, les valeurs pastorales calculées sont :
— de 22 p. 100 selon les indices spécifiques utilisés par DE VRIES,
— de 19,4 p. 100 avec les indices de l'Annexe I.

d) *Valeur des « Indices de qualité ».*

En raison de la subjectivité relative des indices, il n'est pas recommandé d'attribuer une signification absolue à la valeur pastorale d'un herbage pris isolément ; par contre, l'application de ces indices permet d'effectuer des comparaisons très instructives entre les herbages, *à l'intérieur d'une même région naturelle.*

La question est controversée de savoir si les mêmes « indices de qualité » doivent être utilisés dans les diverses régions naturelles. Certains pensent, en effet, qu'il convient de donner une valeur différente à l'indice des espèces qui, par exemple, sont consommées en montagne et ne le sont pas en plaine, ce qui correspondrait à une digestibilité plus grande (DELPECH, 1962 *a*). Nous ne pensons pas qu'il faille retenir cette opinion, du moins tant que des *analyses comparatives précises* n'auront pas été faites. En effet, les travaux suisses ont montré que, toutes choses égales par ailleurs, le rendement s'abaissait proportionnellement à l'augmentation de l'altitude (WENGER, 1950 ; CAPUTA, 1969) : en particulier, la diminution qu'il est possible de calculer à partir « des moyennes de nombreux résultats chiffrés obtenus dans diverses régions des Alpes et du Jura » par CAPUTA (1967) est de 3,8 q/ha/an de matière sèche pour une élévation de 100 m. A cette baisse correspond une baisse de la fréquence des bonnes espèces ; les espèces médiocres semblent n'être consommées en altitude que faute de mieux.

Il ne faut pas attribuer aux indices spécifiques une valeur fonctionnelle absolue qu'ils n'ont pas ; ils n'ont qu'une valeur relative, c'est-à-dire efficiente. Ces indices méritent de retenir l'attention non parce qu'ils sont *vrais*, mais qu'ils sont *efficaces*. Ceci souligné, qu'ils puissent être soumis à une révision appuyée sur l'expérimentation n'est pas douteux ; mais, ainsi que l'a fait ressortir RAYMOND (1963), il s'agit là d'un problème fort complexe, aussi bien par le nombre d'expériences à effectuer (espèces prairiales et régions pastorales très nombreuses) que par la difficulté même de l'expérience.

Enfin, on a pu reprocher aux indices spécifiques de ne pas refléter d'assez près la réaction des espèces à tel ou tel facteur agronomique.

*Exemple* : C'est ainsi que *Poa pratensis* ($I_s = 4$) réagit mieux à l'apport d'azote que *Phleum pratense* ($I_s = 5$), en exploitation fauche, dans l'Artense. Dans le Merlerault, *Holcus lanatus* ($I_s = 2$) produit, en culture pure, autant de matière sèche, à l'hectare et par an, que *Lolium perenne* ($I_s = 5$).

Il faut rappeler que la fonction de l'indice spécifique n'est pas de caractériser la plasticité d'une espèce, sa réaction à l'azote ou sa productivité brute, mais, et seulement, son intérêt zootechnique ; pour ces réactions, il existe d'autres indices appropriés (ELLENBERG, 1963).

### 3. — *Diagramme synthétique de* DE VRIES *et spectre fourrager optimal*

a) *Établissement du diagramme.*

Comme l'ont fait T'HART et DE VRIES (1950), il est possible de combiner les contributions des catégories pastorales et la valeur pastorale des divers herbages d'une région, en un diagramme synthétique comportant :

— en abscisse, la moyenne des valeurs pastorales regroupées en classes de 10 ;

— en ordonnée, la contribution moyenne cumulée des catégories d'espèces dans l'ordre suivant : plantes non fourragères ($D_n$, $G_0$ + R), Graminées moyennes ($G_1$, $G_2$ et $G_3$) Graminées bonnes et très bonnes ($G_4$ et $G_5$), Légumineuses fourragères ($L_1$ à $L_4$) et diverses fourragères ($D_f$).

La figure 7 donne deux exemples de diagramme synthétique : l'un se rapporte au Cantal et l'autre à la Margeride.

b) *Détermination du spectre fourrager optimal.*

Les contributions des diverses catégories d'espèces peuvent être représentées séparément, ce qui donne une courbe par catégorie ; c'est ce qui a été fait sur la figure 8 à partir des données qui avaient permis d'établir la figure 7. Ces courbes partent de l'origine (CS = 0) en ce qui concerne les catégories fourragères, et de CS = 100 pour les plantes non fourragères. Elles sont tracées en trait plein jusqu'à la valeur pastorale maximale *observée*, mais il est possible de les extrapoler.

Cette extrapolation est guidée par les remarques suivantes :

— l'indice spécifique maximal des légumineuses est 4 ; à un peuplement dans lequel les bonnes légumineuses ont une contribution de 100, correspond la VP maximale de 80 (points A sur la figure 8). Il s'agit alors de très bonnes prairies artificielles ;

— dans les très bonnes prairies temporaires, la plupart des graminées ont l'indice 5 ($G_5$), quelques-unes l'indice 4 ($G_4$) ; on peut prendre comme valeur moyenne, 4,75, alors, avec 100 p. 100 de ces espèces, la VP maximale est de 95 (points B sur la fig. 8) ;

— lorsque la valeur pastorale est voisine de 100, les contributions des espèces moyennes et médiocres tendent vers zéro (points C sur la fig. 8).

La possibilité de mettre en évidence des courbes de variation de la contribution des catégories permet de justifier, *a posteriori*, le fait que ANDRIES (1954), DE BOER (1954) et WILLIAMS (1954) caractérisent la valeur pastorale des herbages seulement par la CS de *Lolium perenne* (espèce qui constitue dans les climats humides du N.-W. de l'Europe, l'essentiel des bonnes Graminées).

On notera, en particulier, que la contribution des espèces non fourragères s'annule pour une VP inférieure à 100. L'interprétation, selon cette méthode, des données publiées par l'école hollandaise, montre, qu'en conditions naturelles, il y a

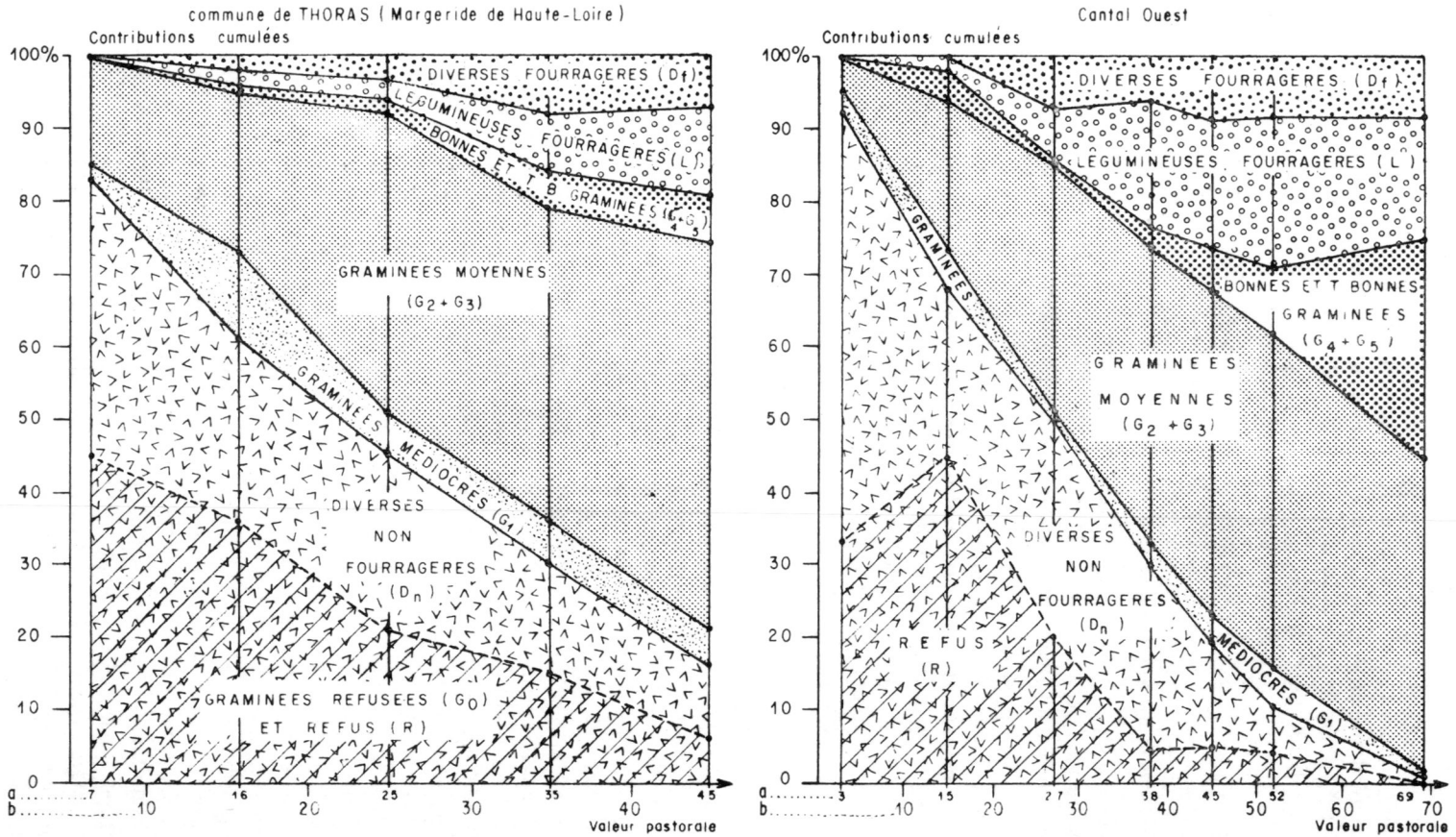



FIG. 7. — *Exemples de diagrammes synthétiques de* DE VRIES *représentatifs des herbages échantillonnés, dans deux régions du Massif central*
*a* = Valeurs pastorales moyennes *b* = Limites des classes de valeur pastorale

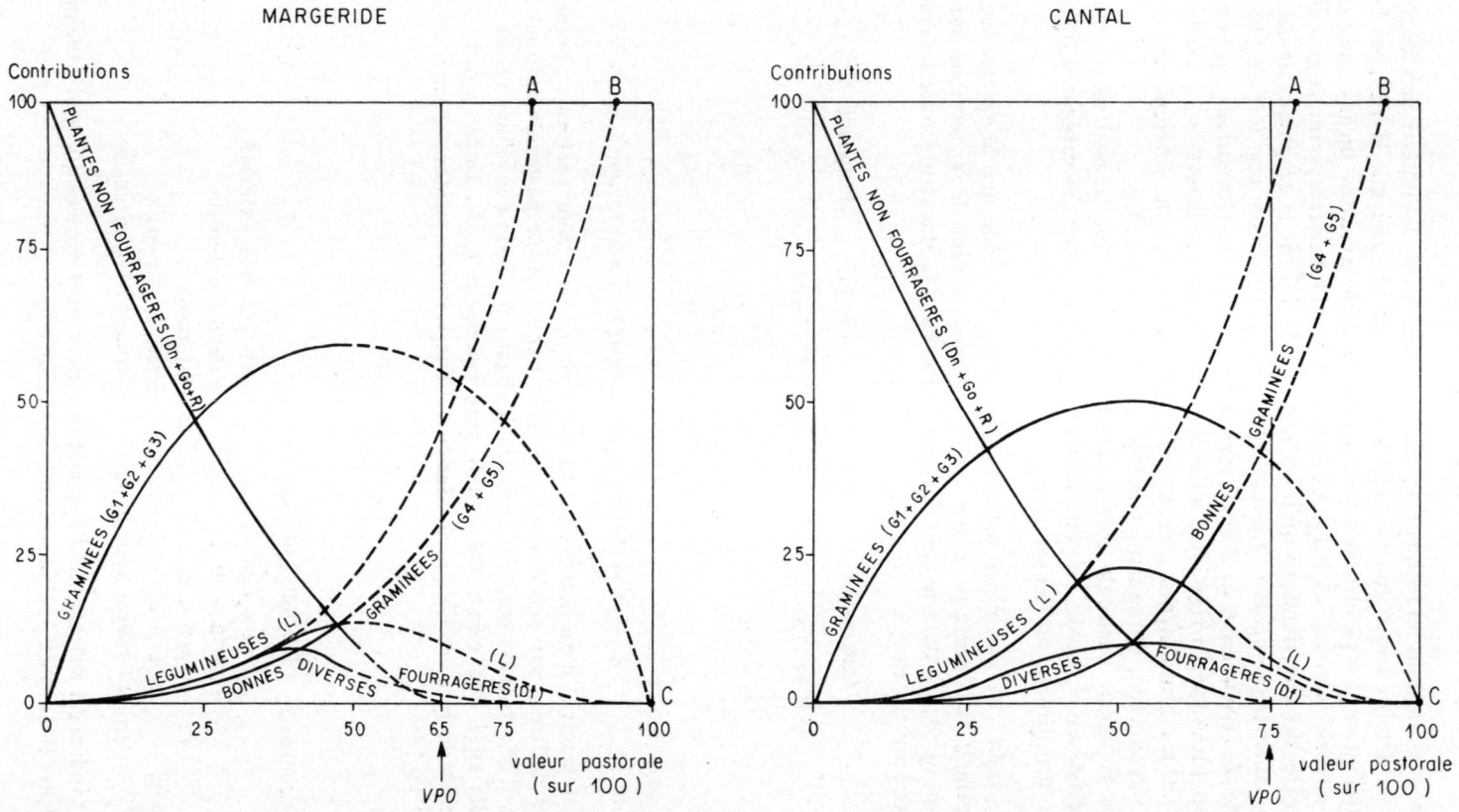



FIG. 8. — *Variations des contributions des diverses catégories fourragères en fonction de la valeur pastorale des herbages, dans deux régions du Massif central*

toujours, même dans les meilleures prairies permanentes, des espèces non fourragères, fût-ce en nombre très réduit ; on est donc conduit à penser que la VP pour laquelle la contribution des plantes non fourragères s'annule constitue un plafond ; c'est la *valeur pastorale optimale* « VPO ». A cette valeur correspondent, pour chaque catégorie fourragère, des contributions qu'il est possible de lire sur le graphique et dont l'ensemble constitue le *spectre optimal*. Tout ceci, soulignons-le une fois de plus, *dans l'optique de l'évolution de la flore en place* sous l'action d'interventions agronomiques diverses (drainages, irrigations, amendements, fumures, entretiens,...) excluant les interventions brutales qui créent un milieu profondément différent et comportent l'introduction d'une flore nouvelle (labours, semis,...).

De la valeur pastorale correspondante, qui peut être considérée comme une caractéristique régionale, on peut déduire les contributions des catégories de plantes par lecture directe sur les courbes.

*Exemple :* A partir des mesures effectuées, il semble que le spectre fourrager optimal soit réalisé pour une valeur pastorale voisine de 90/100 dans les Pays-Bas, de 75/100 dans le Cantal, et de 65/100 dans la Margeride, avec les compositions suivantes :

| Catégories | Pays-Bas | Cantal | Margeride |
|---|---|---|---|
| R et $D_n$ | 0 | 0 | 0 |
| $D_f$ | 0 | 5 | 3 |
| $G_1 + G_2 + G_3$ | 5 | 40 | 55 |
| $G_4 + G_5$ | 95 | 45 | 30 |
| L | 0 | 10 | 12 |

### 4. — *Comparaison des herbages d'une région*

L'état actuel d'un herbage est caractérisé par sa valeur pastorale ; l'état optimal des herbages naturels d'une région l'est par sa valeur pastorale optimale. Cela permet d'effectuer la comparaison des herbages à l'intérieur d'une même région naturelle ainsi que cela a été signalé antérieurement (§ d). Dans ce but, il suffit de calculer le rapport $I_e$ (indice d'intensité d'exploitation pastorale) entre ces deux valeurs :

$$I_e = \frac{VP}{VPO}$$

et de le comparer à l'échelle suivante :

| | |
|---|---|
| au plus égal à 0,19 | herbages très extensifs |
| 0,20 à 0,39 ..... | herbages extensifs |
| 0,40 à 0,59 ..... | état moyen |
| 0,60 à 0,79 ..... | herbages intensifs |
| au moins égal à 0,80 | herbages très intensifs |

Cet indice est susceptible d'applications diverses et variées qui sont développées par ailleurs (DAGET et J. POISSONET, 1967 *b* ; 1970 *b*).

## CONCLUSION

Il y a quelques années, MAYER et REBISCHUNG ont souligné « l'importance de la connaissance de la composition botanique du gazon des prairies » et ajoutaient que « si nous voulons être en mesure [d'en] apprécier la qualité,... il est important de caractériser les gazons par leur flore et de pouvoir, non seulement décrire leur état actuel, mais encore les comparer quand ils sont dans des milieux différents ». Ils faisaient alors ressortir quelques-unes des caractéristiques essentielles que devraient présenter toutes méthodes à retenir : sûreté, facilité de mise en œuvre, débouchés économiques...

Le mode de recueil et d'interprétation des données phytologiques, et plus particulièrement des fréquences des diverses espèces des prairies, qui est proposé ici nous semble pouvoir répondre aux divers critères suggérés.

On a pu voir en particulier que la connaissance précise de l'état floristique d'un herbage et de sa végétation permet de le classer par rapport à un état optimal de référence qu'il est possible de déterminer dans chaque région.

Il convient, toutefois, de souligner que cette méthode ne permet pas de couvrir l'ensemble des problèmes posés par l'étude des prairies ; la biologie des espèces, leur auto-écologie, les problèmes variétaux, ceux qui concernent la détermination de la valeur indicatrice des espèces, toutes questions dont l'importance ne doit pas être sous-estimée, ne sont pas abordés ici.

*Reçu pour publication en octobre 1970.*

## REMERCIEMENTS

Nous remercions nos collègues du C. E. P. E. ainsi que MM. DELPECH, GACHON, HÉDIN, JACQUARD, KERGUÉLEN, qui ont bien voulu examiner ce travail et nous faire part de leurs suggestions.

## SUMMARY

### A METHOD TO ANALYSE THE VEGETATION IN HERBAGES. APPLICATION POSSIBILITIES

The authors describe a simple technic to study the vegetation in herbages ; it consists to check the presences of species at the vertical of hundred points regulary disposed along lines.

The used material varies according to the height of the studied population : double-meter lying on the ground with a point of reading every 4 cm in short-cropped closed vegetation and a long bayonet stuck in the ground every 20 cm in closed high population, with reading along the edge.

Some standards for interpretation and graphs are given, which allow to obtain, for instance the confidence intervals for the observations.

Some essential notions are defined : centesimal frequencies (FC), specific shares (C S), and so on. On the basis of the registered specific shares its defined in the seeded grassland the ideas of soiling and degradation.

For the pastures, the transposition to the data collected with the process described of DE VRIES method allow to caracterize the varied grassland with a synthetic « pastoral value » (VP).

On a practical point of view, this results allow to draw the pastoral diagram, deduce the optimal pastoral spectrum and optimal pastoral value (VPO) for each studied district.

The ratio between the present pastoral value and the optimal value express the herbage condition, or the intensity of utilization of the area on which bear the observations (ecological station, agricultural parcel, exploitation and test-area).

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINE PHYTOLOGISCHE ANALYSENMETHODE FÜR WIESEN ANWENDUNGSMERKMALE

Die Verfasser beschreiben eine einfache Technik zur Untersuchung des Wachstums der Wiesen. Sie besteht aus der Zählung der Pflanzenarten, die sich senkrecht gegenüber 100 längs der Päanzenreihen regelmässig aufgestellten Bezugspunkte befinden. Das verwendete Material wechselt je nach Höhe der untersuchten Pflanzenbestände. In den dichten und flachen Beständen handelt es sich um auf dem Boden niedergelegte Doppelmeter mit Ablesung Punkt für Punkt auf jede 4 cm, und in den hochgewachsenen Beständen um in dem Boden auf jede 20 cm aufgestellte langen Stöcke, mit Ablesung längs des Drahtes.

Normen für Auslegung sowie graphische Darstellungen werden gegeben. Diese erlauben z. B. den Zuverlässigkeitsgrad der Beobachtungen zu bestimmen.

Verschiedene Grundbegriffe werden festgesetzt : Hundertteilige Frequenzen (FC), Spezifische Beiträge (CS) u. s. w. ... Unter Zugrundelegung der verschiedenen eingetragenen spezifischen Beiträge bestimmen sie, in den künstlichen Wiesen, die Begriffe « Verschmutzung » und « Degradierung ».

Was die Weiden anbetrifft so erlaubt die Umstellung der de VRIES — Methode auf diedurc das beschriebene Verfahren gewonnenen Ergebnisse, die verschiedenen Wiesen durch einen synthetischen « Futterwert » zu charakterisieren. Auf dem praktischen Plan erlauben diese Ergebnisse für jedes untersuchte Gebiet Futterdiagramme aufzustellen und ein optimales Futter-Diagramm sowie einen optimalen Futterwert absuleiten.

Das Verhältnis zwischen dem gegenwärtigen Futterwert und dem optimalen Wert ergibt den Ausnützungsgrad der Fläche, auf die sich die Beobachtungen beziehen (ökologische Versuchsanstalt, landwirtschaftliche Parzelle, landwirtschatflicher Betrieb. Testgebiet).

## РЕЗЮМЕ

*Метод фитологического анализа лугов, и критерии его применения.*

Ф. ДАЖЭ, Ж. ПУАССОНЭ.

Авторы описывают простой способ изучения растительности травостоя; он заключается в учтении всех присутствующих видов по вертикали сотни пунктов равномерно распределенных по всей длинне линий. Применяющийся материал меняется в зависимости от высоты изучающихся популяций : двухметровая линейка, горизонтально положенная на землю и пунктуальная читка каждые 4 сантиметра в популяциях разреженных и низких, длинный штык втыкаемый в землю каждые 20 см., и на котором читка производится вдоль острия, в популяциях плотных и высоких.

Даются нормы интерпретации и номограммы, благодаря которым можно, например, получить надежные интервалы для наблюдений.

Определяются разные основные понятия : частоты по сотням (FC), специфический вклад (CS) и т. д. На базе разных специфических вложений, определяются также для искуственных лугов, понятия засорения и деградации.

Сопоставление данных полученных при применении описанного метода, с данными метода де Вриеса, дает возможность охарактеризовать различные травостои пастбищ по их синтетической « пастбищной ценности ». В практическом отношении, полученные результаты помогают составить кормовые диаграммы изученных районов и вывести из них оптимальные кормовые спектры и оптимальную пастбищную ценность.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ACTA, 1964. *Clé de détermination de quelques graminées au stade herbacé.* Acta, Paris, 2 pages.

ANDRIES A., 1950. L'appréciation dans la pratique de la valeur agricole des herbages par l'examen de la composition botanique. *Rev. Agric.*, **3**, 12, 1302-1316.

ANDRIES A., 1954. La cartographie des prairies en Belgique. *C. R. Conf. Europ. des herbages*, O. E. C. E. Paris, 28-30.

ANDRIES A., 1956. La cartographie botanique des prairies. I. Carte des prairies de la région herbagère Fagne. *Revue de l'Agriculture*, **2**, 35 p.

AREU Y PIDAL, 1961. Methodo de Klapp-König y Stählin para expressar el valor alimentico di un pastizal. *Montes*, **102**, 603-609.

AYMONIN G., 1966. Le phénomène d'adventicité. *C. R. 2e Col. Int. de Biol. des mauvaises herbes.* Grignon 1965, 13 p.

BOURLIÈRE F., LAMOTTE M., 1967. Les fondements physiologiques et démographiques des notions de production et de rendement bio-énergétiques. *Problèmes de productivité biologique*, Lie Masson, Paris, 1-35.

BROWN D., 1954. *Methods of surveying and measuring vegetation.* Bull. (42), Com. Agric. Bur. Farnham Royal, Bucks, 223 p.

BRUCE-LEVY E., 1927. The grasslands of New Zealand. *N. Z. J. Agric.*, **34**, 145-164.

CAIN S., CASTRO G., 1959. *Manual of vegetation analysis.* Harper and Brs, N. Y., 325 p.

CANFIELD R. H., 1941. Application of the line intercept methods in sampling range vegetation. *J. Forestry*, **39**, 388-384.

CAPUTA J., 1961. *Les plantes fourragères.* Lie Payot, Lausanne, 208 p.

CAPUTA J., 1967. Production fourragère suivant l'altitude. *Expériences fourragères*, A.O.C.F., Lausanne, **9**, 26-37.

CAPUTA J., 1969. Potentialités fourragères en zone de montagne. *Com. journées d'hiver de l'A. F. P. F.*, 14 p.

DAGET-BERTOLETTI L., 1969. Présentation de 5 essais sur prairies permanentes. *I. T. C. F.*, Paris, 43 p.

DAGET Ph., 1968. Quelques remarques sur les distributions de fréquences spécifiques dans les phytocénoses. *Œcol. Plant.*, **3**, 299-312.

DAGET Ph., 1970. Analyse de la dispersion spécifique dans les formations herbacées. *Com. Ve Col. Écologie, école normale sup.*, Paris (12-14 mars 1970), 15 p.

DAGET Ph., POISSONET J., 1965 *a*. *Contribution à l'étude des herbages des plateaux basaltiques de l'Ouest du Cantal.* C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, document nº 16, 120 p. + annexes.

DAGET Ph., POISSONET J., 1965 *b*. *Étude sommaire de trois groupes de stations prairiales de la Margeride.* C. N. R. S.-C. E. P. E. Montpellier, document nº 17, 12 p.

DAGET Ph., POISSONET J., 1965 *c*. *Caractères phyto-écologiques des stations utilisées pour fournir des ressources alimentaires au bétail dans la Margeride de Lozère.* C. N. R. S.-C. E. P. E. Montpellier, document nº 19, 36 pages + annexes.

DAGET Ph., POISSONET J., 1966. *Étude phyto-écologique de la commune de Thoras* (Haute-Loire). C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, document nº 28, 620 p. en 5 fasc. + annexes.

DAGET Ph., POISSONET J., 1969 *a*. Principes d'une technique d'analyse quantitative de la végétation des formations herbacées. *Com. Sem. sur les méthodes d'inventaire des prairies permanentes Montpellier (25 et 26 mars 1969)*, 16 p.

DAGET Ph., POISSONET J., 1969 *b*. Mode d'appréciation du niveau d'intensité de l'utilisation des herbages. Quelques applications. *Com. Sem. sur les méthodes d'inventaire des prairies permanentes, Montpellier (25 et 26 mars 1969)*, 16 p.

DAGET Ph., POISSONET J., 1970 *a*. Distribution des fréquences spécifiques dans les phytocénoses herbacées en déséquilibre. *Com. V^e Col. Écologie, École normale supérieure, Paris (12-14 mars 1970)*, 25 p.

DAGET Ph., POISSONET J., 1970 *b*. *Mode d'évaluation du potentiel pastoral des herbages à partir de l'inventaire phytologique* (sous presse).

DE BOER Th., 1954. Les herbages, leur classification par l'étude des unités de végétation, leur valeur écologique et agricole aux Pays-Bas. *C. R. Conf. Europ. des herbages, O. E. C. E.*, Paris, 39-46.

DELPECH R., 1960. Critères de jugement de la valeur agronomique des prairies. *Fourrages*, **4**, 83-98.

DELPECH R., 1962 *a*. Comment améliorer les prairies permanentes. *Bull. C. E. T. A.*, étude n° 726, 8 p.

DELPECH R., 1962 *b*. Écologie appliquée. Possibilité de déterminer les conditions de milieu par l'examen de la végétation (cas des prairies). *B. T. I.*, **172**, 734-749.

DELPECH R., BERTOLETTI L., 1968. *Plantes des prairies permanentes*. Série graminées, A. C. T. A., Paris, 10 p. et 34 planches.

DE VRIES D. M., 1937. Methods of determining the botanical composition of hay fields and pastures. *Rep.* IVth. *Int. Grassl. Congr. Aberystwyth*, 474-480.

DE VRIES D. M., 1938. The plant sociological combined specific frequency and other method. *Chronica botanica*, **4** 115-117.

DE VRIES D. M., 1950. Grasland typen en hun oecologie. *Neth. Kruidk. Arch.*, **57**, 28-31.

DE VRIES D. M., T'HART M. L., KRUIJNE A., 1942. Eeen waardering van grasland op grond van de plantkundige samenstelling. *Landbouwk. Tijdschr.*, Wageningen, **54**, 245-265.

DE VRIES D. M., DE BOER Th., DRIVEN J., 1949. Evaluation of grassland by botanical research in the Netherland. *Nations Unies*, E/CONF. 7/SEC/W. 159, 8 p.

DE VRIES D. M., KOOPMANS J., 1949. Het verband tussen de Hoedanigheidsgraad van grasland en stand plaatsfactoren. *Tidj. Cent. Inst. voor Land. boukundig Onderzoek, Wageningen*, **61**, 1, 21-37.

DE VRIES D. M., DE BOER Th., 1959. Methods used in botanical grassland research in the Netherland and their application. *Herbage Abst.*, **29**, 1, 1-7 (bibl.).

DE VRIES D. M., KRUIJNES A., 1960. The influence of nitrogen fertilization on botanical composition of permanent grassland. *Stikstof*, **4**, 11 p.

ELLENBERG H., 1963. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. Ulmer, Stuttjort. 943 p.

FLAHAULT Ch., 1901. Premier essai de nomenclature phytogéographique. *Bull. Soc. Lang. Géogr.*

FOURNIER P., 1961. *Les quatre flores de France*. Le Chevalier, Paris, 1105 p.

GAIN E., BROCQ-ROUSSEN D., 1912. *Traité des foins*. La Maison Rustique, Paris, 795 p.

GARAUDEAUX J., s. d. *Les prairies et leur flore*. 44 p.

GODRON M., 1966. Application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité de la structure de la végétation. *Œcol. Plant.*, **1**, 187-197.

GODRON M., 1968. Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale. *Œcol. Plant.*, **3**, 185-212.

GODRON M., CORRE J., FLORET C., GASTON A., GRANDJOUAN G., GUILLERM J. L., LONG G., POISSONET J., TRABAUD L., 1962. *Codification et transcription sur cartes mécanographiques perforées des relevés d'inventaire de la végétation*. C. N. R. S.-C. E. P. E., 235 p.

GODRON M. *et al.*, 1964. *Notice détaillée. Carte phyto-écologique et carte de l'occupation des terres de Sologne*. C. N. R. S., Paris, 192 p. + cartes.

GODRON M., POISSONET J., POISSONET P., 1967. *Méthode d'étude des formations herbacées denses. Essai d'application à l'étude du dynamisme de la végétation*. C. E. P. E., Montpellier, document n° 35, 28 p.

GODRON M., DAGET Ph., EMBERGER L., LONG G., LE FLOC'H E., POISSONET J., SAUVAGE Ch., WACQUANT J. P., 1968. *Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu*. C. N. R. S., Paris, 292 p.

GOODALL D., 1953. Point quadrat methods for the analysis of vegetation. *Aust. J. Bot.*, **1**, 457-461.

GOUNOT M., 1958. Contribution à l'étude des groupements végétaux messicoles et rudéraux de la Tunisie. *Ann. Serv. Bot. et Agron. de Tunisie*, **31**, 1-282.

GOUNOT M., 1960. Méthodes d'études et d'inventaire de la végétation pastorale et prairiale. *Fourrages*, **4**, 46-52.

GOUNOT M., 1961. Méthodes d'inventaire de la végétation. *Bull. Serv. Carte Phytogéogr.*, B, **6**, 1, 7-73.

GOUNOT M., 1969. *Méthodes d'étude de la végétation*, Lie Masson, Paris, 314 p.

GREIG-SMITH P., 1964. *Quantitative plant ecology*. Butterworths Sc. Publ., London, 256 p.

GUILLERM J. L., 1969. *Relations entre la végétation spontanée et le milieu dans les terres cultivées du Bas-Languedoc*. Thèse de spécialité, Montpellier, 160 p.

T'HART M., DE VRIES D. M., 1950. La prairie et l'exploitation de la prairie aux Pays-Bas. *B. T. I.*, **52**, 547-551.

HÉDIN L., 1945. Contribution à l'étude des formes biologiques des espèces prairiales. *Ann. Agron.*, 235-278.

HÉDIN L., LEFÉBVRE J. M., 1951. Les méthodes d'analyse botanique dans l'étude agronomique des prairies. *Ann. Amél. Pl.*, 376-407.

HÉDIN L., DUVAL E., 1967. Intérêt de l'étude de la production primaire en écologie prairiale. *Problèmes de productivité biologique*, Lie Masson, Paris, 93-112.

HUBBARD C., 1959. *Grasses*. A Pelican book, 428 p.

JACQUARD P., DAGET Ph., POISSONET J., LAROCHE G., 1968. *Expression de l'évolution du potentiel de production et de la composition botanique d'une formation herbacée dense*. C. N. R. S.-C. E. P. E., document nº 47, 22 pages.

KERGUÉLEN M., s. d. *Clef des légumineuses prairiales et cultivées* . Lab. Plant. Four., Rouen, 6 p.

KERGUÉLEN M., 1960. Quelles indications peut-on retirer de l'analyse botanique des herbages. *Fourrages*, **4**, 70-82.

KERGUÉLEN M., 1965. Clef de détermination de quelques graminées au stade herbacé *in* DUTHIL. *La Production fourragère*, Lie Baillère, Paris, 325-335.

KERSHAW K., 1957. The use of cover and frequency in the detection of pattern in plant community. *Ecology*, **38**, 2, 291-299.

KERSHAW K., 1958. An investigation on the structure of a grassland community. *Ecol.*, 1958, 44-47, 571-592 et 1959, 31-55.

KIFFMANN R., 1962. *Ecology, Echte gräser* (*gramineae*). Freising-Weihenstephan. 51 p.

KLAPP E., 1954. *Wiesen und Weiden*, Paul Parey, Berlin, 519 p.

KLAPP E., 1958. *Grünlandkräuter*, Paul Parey, Berlin, 96 p.

KLAPP E., 1965. *Taschenbuch der Gräser*, Paul Parey, Berlin, 260 p.

KLAPP E., BOEKER P., KÖNIG F., STÄHLIN A., 1953. Wertzahlen der Grnülandpflanzen. *Das Grünland*, Heft 5, 38-40.

KNOLL H., 1954. État actuel des enquêtes sur les herbages de la Bade du sud. *C. R. Conf. Europ. des Herbages*, O. E. C. E., 46-52.

KOP L., 1965. Moisture indication on grassland by vegetation and soil ; a comparaison of maps. *Neth. J. Agric. Sci.*, **13**, 1, 6-20.

KRUIJNE A., DE VRIES D. M., 1963. *Data concerning important herbage plants*. Inst. Voor. biol. en scheikundig, Onderz. (222), Wageningen, 45 p.

KRUIJNE A., DE VRIES D. M., 1968. *Vegetatieve herkenning ban onze grasland-planten*. H. Veeman en Zonen, N. N., Wageningen, 111 p.

LAISSUS R., POISSONET J., 1970. Quelques résultats des essais sur prairie permanente dans le « Domaine expérimental du Vieux-Pin » (Orne). *Com. Sem. méthodes d'inventaire des prairies permanentes, Montpellier (25-26 mars 1970)*, 12 p.

LAMBERT J., 1963. Recherches phytosociologiques sur les prairies de moyenne Ardenne. *Agriculture*, **11** (2), (1), 5-198.

LAMOTTE M., 1962. *Initiation aux méthodes statistiques en biologie*. Lie Masson, Paris, 144 p.

LEVY E. et MADDEN E., 1933. The point method of pasture analysis. *New. Zeal. J. Agr.*, **46**, 267-279.

LONG G., 1957. Description d'une méthode linéaire pour l'étude de l'évolution de la végétation. *Bull. Serv. Carte Phytogéogr.*, B, **3**, (2) 107-128.

LONG G., POISSONET P., POISSONET J., GODRON M., DAGET Ph., 1970. *Méthodes d'analyse par points de la végétation prairiale dense*. C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, Document nº 55, 31 p.

MAYER R., REBISCHUNG J., s. d. *Composition botanique et variétale de l'herbe*, I. N. R. A., St. Cent. Amél. Pl., Versailles, 14 p.

PARKER K., 1951. A method for measuring trend in range condition. *Nat. forest range Adm. Studies Forest. Serv.*, U. S. D. A., 26 p.

PAVILLARD J., 1935. *Eléments de sociologie végétale*. A. S. I., nº 251, Lie Hermann, Paris, 102 p.

POISSONET J., 1965. *Expression de la valeur fourragère* (*Indices spécifiques et valeur agronomique*) *des herbages de la Margeride*. C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, document nº 20, 10 p.

POISSONET J., 1966. Formations herbacées denses de l'Ouest du Cantal. *Sém. Formations herbacées denses de Salers*, C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, 20-38.

POISSONET J., 1968. *Recherche sur une loi d'équilibre dans la composition floristique des formations herbacées denses*. C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, 18 p.

POISSONET P., 1969. Comparaison des résultats obtenus par diverses méthodes d'analyse de la végétation dans une prairie permanente. *Com. Sem. méthodes d'inventaire des prairies permanentes, Montpellier (25 et 26 mars 1970)*, 33 p.

POISSONET P., POISSONET J., 1969. *Essai de comparaison de méthodes d'analyses phytosociologiques et agronomiques des formations herbacées denses permanentes*. C. N. R. S.-C. E. P. E., Montpellier, document nº 50, 120 p.

PRESCENVY S., 1957. The correlation between ground cover and vegetation yield. *Port. Acta Biol.*, **6**, (1), 94-96.

RAYMOND F., 1963. Correspondance entre la qualité d'un fourrage et la quantité consommée. *Proc. Symp. Europ. Grassl. Fed.*, **16**, 75-84.

SCHWEIGHART O., 1962. *Fotobuch der Wiesenpflanzen.* BLV Verlag, München, 324 p.

THURMANN J., 1849. *Essai de phytostatique appliquée à la chaîne du Jura et des contrées voisines.* Berne, 379 p.

VOGLER E., 1962. *Gräserbestimmung nach Photos.* Paul Parey, Berlin, 107 p.

WENGER H., 1950. *L'appréciation du bétail tacheté du Simmenthal.* C. Wyss., Berne, 93 p.

WILLIAMS T. E., 1954. Carte des herbages de l'Angleterre et du Pays de Galles et classement agronomique des herbages. *C. R. Conf. Europ. des herbages*, O. E. C. E., Paris, 31-34.

# ANNEXE I

## INDICES SPÉCIFIQUES UTILISÉS POUR LE CALCUL DES VALEURS PASTORALES

### *Graminées*

| Espèces | $I_s$ | Espèces | $I_s$ |
|---|---|---|---|
| *Dactylis glomerata* | 5 | *Festuca rubra* | 2 |
| *Festuca pratensis* | 5 | *Gaudinia fragilis* | 2 |
| *Lolium multiflorum* | 5 | *Glyceria fluitans* | 2 |
| *Lolium perenne* | 5 | *Holcus lanatus* | 2 |
| *Phleum pratense* | 5 | *Poa annua* | 2 |
| | | *Sesleria coerulea* | 2 |
| *Alopecurus pratensis* | 4 | | |
| *Arrhenatherum elatius* | 4 | *Alopecurus geniculatus* | 1 |
| *Poa chaixii* | 4 | *Anthoxanthum odoratum* | 1 |
| *Poa pratensis* | 4 | *Brachypodium pinnatum* | 1 |
| *Poa trivialis* | 4 | *Briza media* | 1 |
| | | *Bromus mollis* | 1 |
| *Agrostis alba stolonifera* | 3 | *Cynosurus cristatus* | 1 |
| *Agrostis vulgaris* | 3 | *Danthonia decumbens* | 1 |
| *Avena pratensis* | 3 | *Deschampsia flexuosa* | 1 |
| *Avena pubescens* | 3 | *Festuca duriuscula* | 1 |
| *Festuca arundinacea* | 3 | *Festuca ovina* | 1 |
| *Trisetum flavescens* | 3 | *Holcus mollis* | 1 |
| | | *Hordeum murinum* | 1 |
| *Agropyrum repens* | 2 | *Koeleria cristala* | 1 |
| *Agrostis canina* | 2 | *Koeleria valesiana* | 1 |
| *Bromus erectus* | 2 | | |

### *Légumineuses*

| Espèces | $I_s$ | Espèces | $I_s$ |
|---|---|---|---|
| *Medicago sativa* | 4 | *Vicia angustifolia* | 3 |
| *Onobrychis sativa* | 4 | *Vicia cracca* | 3 |
| *Trifolium hybridum* | 4 | *Vicia hirsuta* | 3 |
| *Trifolium pratense* | 4 | *Vicia sepium* | 3 |
| *Trifolium repens* | 4 | | |
| | | *Trifolium arvense* | 2 |
| *Anthyllis vulneraria* | 3 | *Trifolium campestre* | 2 |
| *Lathyrus pratense* | 3 | *Trifolium dubium* | 2 |
| *Lotus corniculatus* | 3 | *Trifolium spadiceum* | 2 |
| *Lotus uliginosus* | 3 | | |
| *Medicago falcata* | 3 | *Genista pilosa* | 1 |
| *Medicago lupulina* | 3 | *Ornithopus perpusillus* | 1 |
| *Trifolium montanum* | 3 | | |

*Plantes diverses fourragères*

| Espèces | $I_g$ | Espèces | $I_g$ |
|---|---|---|---|
| *Sanguisorba officinalis* | 3 | *Taraxacum officinale* | 2 |
| *Achillea millefolium* | 2 | *Alchemilla vulgaris* | 1 |
| *Carum carvi* | 2 | *Leontodon automnalis* | 1 |
| *Meum athamanticum* | 2 | *Leontodon hispidus* | 1 |
| *Plantago lanceolata* | 2 | *Scorsonera humilis* | 1 |
| *Plantago major* | 2 | *Tragopogon pratensis* | 1 |
| *Sanguisorba minor* | 2 | | |

*Nota bene :* dans les exemples cités, la valeur o a été donnée à toutes les espèces trouvées ne figurant pas sur cette liste (y compris Graminées et Légumineuses).

*Cas des refus*

Parmi les refus spécifiques permanents on trouve notamment :
Refus herbacés.

*Caltha palustris*
*Centaurea nigra*
*Cirsium palustre*
*Comarum palustre*
*Deschampsia coespitosa*
*Equisetum hiemale*
*Gentiana cruciata*
*Gentiana lutea*
*Gentiana pneumonanthe*
*Heracleum sphondylium*
*Juncus buffonius*
*Juncus conglomeratus*
*Juncus silvaticus*
*Juncus squarrosus*
*Leuzea conifera*
Lichens divers
*Hieracium pilosella*
*Menyanthes trifoliata*
Mousses diverses
*Nardus stricta*
*Parnassia palustris*
*Polygonum bistorta*
*Ranunculus acer*
*Ranunculus bulbosus*
*Ranunculus repens*
*Senecio adonidifolius*

Refus ligneux non vulnérants.

*Calluna vulgaris*
*Cytisus purgens*
*Genista sagittalis*
*Genista tinctoria*
*Salix repens*
*Sarothamnus scoparius*
*Vaccinium myrtillus*
*Vaccinium vitis-idaea*

Refus ligneux vulnérants.

*Genista anglica*
*Ononis spinosa*

## ANNEXE 2

### Tableau récapitulatif de fréquences spécifiques (FS) et contributions spécifiques (CS) du relevé 37-D-67/CEPE pris ici comme exemple

| Espèces | FS | CS | Espèces | FS | CS |
|---|---|---|---|---|---|
| Graminées | 195 | 49,3 | Diverses non fourragères | | |
| *Nardus stricta* | 30 | 7,6 | *Rhinanthus minor* | 3 | 0,8 |
| *Danthonia decumbens* | 25 | 6,3 | *Galium verum* | 8 | 2,0 |
| *Agrostis vulgaris* | 44 | 11,1 | *Galium asperum* | 2 | 0,5 |
| *Agrostis alba* | 3 | 0,8 | *Betonica officinalis* | 7 | 1,8 |
| *Festuca rubra* | 37 | 9,3 | *Campanula rotundifolia* | 5 | 1,3 |
| *Deschampsia flexuosa* | 21 | 5,3 | *Pimpinella saxifraga* | 2 | 0,5 |
| *Anthoxanthum odoratum* | 16 | 4,0 | *Veronica officinalis* | 1 | 0,3 |
| *Poa pratensis* | 1 | 0,3 | *Thymus serpyllum* | 5 | 1,3 |
| *Briza media* | 11 | 2,8 | *Meum athamenticum* | 1 | 0,3 |
| *Avena pubescens* | 7 | 1,8 | *Scabiosa columbaria* | 2 | 0,5 |
| Légumineuses | 16 | 4,1 | Refus | 67 | 17,1 |
| *Trifolium repens* | 9 | 2,3 | *Senecio adonidifolius* | 1 | 0,3 |
| *Trifolium pratense* | 4 | 1,0 | *Genistella sagittalis* | 15 | 3,8 |
| *Lotus corniculatus* | 3 | 0,8 | *Hieracium pilosella* | 14 | 3,5 |
| Diverses fourragères | 5 | 1,3 | *Orchis sp. 2* | 1 | 0,3 |
| | | | *Ranunculus bulbosus* | 2 | 0,5 |
| *Plantago lanceolata* | 1 | 0,3 | *Gentiana lutea* | 16 | 4,0 |
| *Achillea millefolium* | 4 | 1,0 | *Polytrichum sp. 1* | 7 | 1,8 |
| Diverses non fourragères | 113 | 28,8 | *Mnium sp.* | 9 | 2,3 |
| | | | *Rhitidiadelphus squarrosus* | 1 | 0,3 |
| *Potentilla aurea* | 7 | 1,8 | *Pleurozium schreberi* | 1 | 0,3 |
| *Potentilla tormentilla* | 30 | 7,6 | | | |
| *Potentilla verna* | 2 | 0,5 | | | |
| *Luzula vulgaris* | 9 | 2,3 | | | |
| *Carex caryophyllea* | 29 | 7,3 | Total | 396 | 100 |

*Ann. agron.*, 1971, **22** (1), 43-93.

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ÉVOLUTION DES MICAS (BIOTITES)

## I. — Les aspects du processus de vermiculitisation

M. ROBERT

*Laboratoire des Sols,*
*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.*
*78 - Versailles*

---

RÉSUMÉ

L'étude porte sur les deux principaux aspects du processus de vermiculitisation des micas trioctaédriques.

Le premier se traduit par l'ouverture des feuillets et résulte d'un simple remplacement du potassium par des ions plus hydratables.

Le deuxième concerne des aspects complémentaires de cette ouverture : l'oxydation des cations octaédriques (fer ferreux). L'étude très fine de cette oxydation permet d'en préciser le mécanisme et d'établir les relations existant entre oxydation et ouverture. Elle permet en particulier de mettre en évidence des interactions essentielles entre la composition de la couche octaédrique des micas, leur constitution hydroxylique et la libération du potassium.

---

## INTRODUCTION

Dans un article précédent (1), nous avons fait ressortir l'importance particulière de l'évolution des micas dans le déclenchement du processus de désagrégation des granites. Afin de pousser plus avant l'analyse des phénomènes, nous avons été conduits à étudier plus spécialement au cours d'une deuxième étape, les processus d'altération de ces minéraux. Mais, nous considérerons alors ceux-ci d'après les

(1) Étude expérimentale de la désagrégation du granite. *Ann. agron.*, 1970, **21** (6), 777-817.

données que nous avons déjà obtenues, c'est-à-dire en tenant compte plus particulièrement du caractère spécifique ou global de l'action mise en jeu.

— Ainsi, l'évolution liée à une extraction spécifique du potassium qui aboutit à des minéraux voisins des vermiculites, nous amènera à envisager le problème de la vermiculitisation dans son ensemble. Au cours de l'analyse de ce problème, nous aurons d'ailleurs à préciser et à dissocier l'intervention du phénomène d'oxydation qui lui apparaît lié et que l'on a parfois pu considérer comme une des causes de la vermiculitisation.

— Mais, comme dans le milieu naturel, les actions sont rarement aussi spécifiques, nous aborderons également les problèmes posés par des actions plus globales et en particulier par les différents types de dégradation, tels que acidolyse, alcalinolyse, hydrolyse, ou intervention de complexants organiques qui peuvent affecter les constituants micacés dans le milieu naturel. Nous serons ainsi à même de dresser un schéma général de l'évolution des micas trioctaédriques (1).

## I. — ÉTUDE DU PROCESSUS DE VERMICULITISATION DES MICAS PAR EXTRACTION DU POTASSIUM

Nous avons choisi d'opérer sur des minéraux micacés purs, mais afin de permettre des recoupements aisés avec la première partie de ce travail, le mica de base utilisé dans toutes nos études sera la biotite extraite du granite de Varennes qui nous a servi précédemment. Au demeurant, pour mieux cerner les mécanismes mis en cause au cours des évolutions, nous serons également amenés d'une part à utiliser des micas trioctaédriques à très faible teneur en $Fe^{2+}$ (phlogopite de Madagascar), et d'autre part, à établir quelques comparaisons, soit avec d'autres micas trioctaédriques (biotite de Mazataud riche en $Fe^{2+}$ et contenant du fluor), soit des minéraux dioctaédriques dont nous avons vu dans la première partie qu'ils se prêtent mal à l'extraction du potassium (muscovite de Madagascar, illite du Puy).

Nous présentons dans le tableau 1 les analyses chimiques totales des micas soumis aux divers traitements et dans le tableau 2, les formules structurales calculées à partir de ces analyses en se basant sur la présence de 11 oxygènes dans le mica calciné.

### A. — Comportement de la biotite de varennes

Nous avons utilisé sur micas (0,5 - 1 mm), toute une série de composés qui s'étaient révélés aptes à extraire le potassium du granite : le cobaltinitrite de sodium (White, 1959), le tétraphénylborate de sodium (Scott *et al.*, 1960) et des sels comme NaCl N ou $MgCl_2$ N.

Dans un premier temps, nous suivrons l'extraction du potassium au fur et à mesure des expériences pour vérifier la progression de l'évolution. Nous essayerons ensuite de caractériser cette évolution par l'étude des transformations minéralogiques obtenues, avant de dresser un bilan complet à l'aide des formules structurales.

(1) Cette étude plus générale fera l'objet d'un 3e article.

TABLEAU I

*Analyses chimiques totales*

(en p. 100 d'oxydes)

| | Biotite de Varennes | Biotite de Mazataud | Phlogopite de Madagascar | Muscovite de Lubersac | Illite du Puy |
|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ ..... | 36,92 | 35,71 | 38,30 | 45,18 | 49,50 |
| $Al_2O_3$ ..... | 14,69 | 21,24 | 17,42 | 36,26 | 21,19 |
| $TiO_2$ ..... | 3,94 | 2,46 | 1,15 | 1,00 | 0,82 |
| $Fe_2O_3$ ..... | 1,11 | 0,78 | 2,37 | 1,00 | 6,17 |
| FeO ..... | 17,74 | 20,02 | 3,05 | 0,72 | 0,43 |
| MgO ..... | 11,53 | 3,28 | 23,60 | 1,23 | 3,67 |
| MnO ..... | 0,35 | 1,02 | 0,27 | 0,12 | 0,15 |
| CaO ..... | 1,03 | 0,52 | 0,38 | 0,15 | 0,90 |
| $Na_2O$ ..... | 0,31 | 0,37 | 0,41 | 0,69 | 0,24 |
| $K_2O$ ..... | 8,55 | 9,10 | 9,80 | 10,35 | 7,35 |
| Perte au feu (1 500°) .. | 2,52 | 3,60 | 3,98 | 4,90 | 9,10 |
| $F^-$ ..... | 0,15 | 1,15 | 0,60 | — | — |
| $P_2O_5$ ..... | 0,52 | — | — | — | — |

TABLEAU 2

*Formules structurales des micas utilisés au cours des expériences*

| | |
|---|---|
| Biotite de Varennes | $Ca_{0,030}K_{0,827}Na_{0,045}[(Al_{0,102}Ti_{0,223}Fe^{3+}_{0,062})(Fe^{2+}_{1,119}Mg_{1,30}Mn_{0,022})](Al_{1,207}Si_{2,792})0_{10}(OH)_2$ |
| Phlogopite de Madagascar | $Ca_{0,028}K_{0,878}Na_{0,055}[(Al_{0,126}Ti_{0,06}Fe^{3+}_{0,177})(Fe^{2+}_{0,124}Mg_{2,468}Mn_{0,016})](Al_{1,312}Si_{2,688})0_{10}[(OH)_{1,86}F_{0,14}]$ |
| Biotite de Mazataud | $Ca_{0,042}K_{0,896}Na_{0,055}[(Al_{0,681}Ti_{0,142}Fe^{3+}_{0,044})(Fe^{2+}_{1,287}Mg_{0,377}Mn_{0,042})](Al_{1,247}Si_{2,753})0_{10}[(OH)_{1,60}F_{0,40}]$ |
| Muscovite de Lubersac | $Ca_{0,01}K_{0,874}Na_{0,088}[(Al_{1,811}Ti_{0,028}Fe^{3+}_{0,049})(Fe^{2+}_{0,04}Mg_{0,121}Mn_{0,007})](Al_{1,013}Si_{2,987})0_{10}(OH)_2$ |
| Illite du Puy | $Ca_{0,067}K_{0,66}Na_{0,03}[(Al_{1,236}Ti_{0,04}Fe^{3+}_{0,32})(Fe^{2+}_{0,025}Mg^{2+}_{0,384}Mn_{0,07})](Al_{0,519}Si_{3,481})0_{10}(OH)_2$ |

### 1. *Libération du potassium*

a) *Allure du processus.*

Les solutions d'attaque ont été renouvelées dès que la quantité de $K_2O$ extraite reste constante, ce qui correspond à une période de 4 à 5 jours. Nous avons reporté sur la figure 1 la quantité cumulée de $K_2O$ (exprimée en p. 100 du $K_2O$ total contenu dans le mica) en fonction du nombre de traitements.

L'examen des courbes obtenues fait alors ressortir qu'avec tous les réactifs, l'extraction du potassium est, au bout d'un temps plus ou moins long, quasi totale ($K_2O$ restant dans le mica < 0,2 p. 100).

En revanche, il apparaît difficile de comparer les différentes courbes les unes aux autres, car chaque traitement met en cause à la fois le comportement du minéral, et l'agressivité du réactif.

Ainsi par exemple, le palier d'extraction est atteint beaucoup plus vite avec NaCl (1 à 2 jours) qu'avec $MgCl_2$ (4 à 5 jours) ; le choix d'une périodicité de 4 à 5 jours pour les renouvellements avantage donc ce dernier type de traitement.

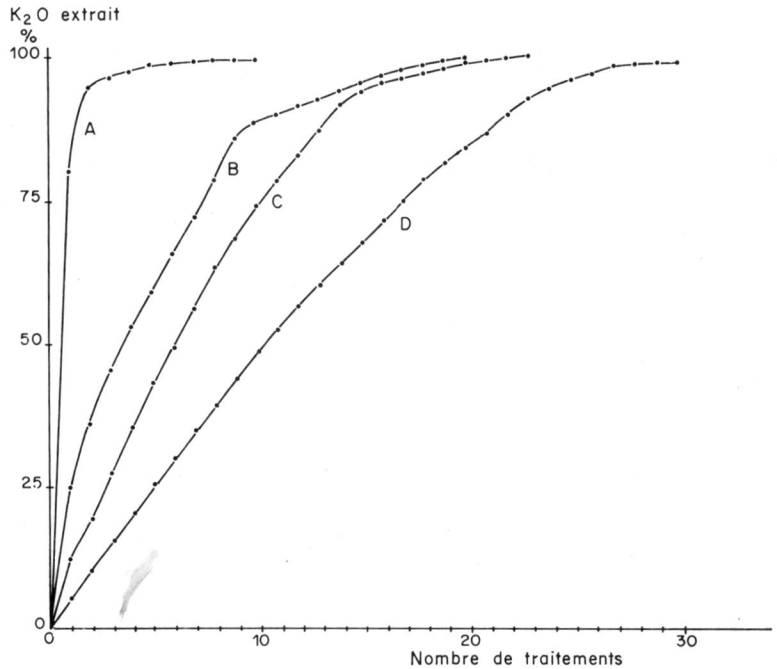



FIG. 1. — *Libération du potassium sous l'influence de différents traitements*
A — traitement au cobaltinitrite
B — traitement au tétraphénylborate
C — traitement par $MgCl_2$ N
D — traitement par NaCl N

Il apparaît que l'insolubilisation du potassium sous forme de tétraphénylborate ou de cobaltinitrite, en accélère l'extraction. Ainsi, le cobaltinitrite, en un seul traitement permet d'extraire près de 75 p. 100 du potassium présent dans le minéral.

En ce qui concerne l'allure du processus de libération, on peut distinguer d'une façon nette 2 périodes : dans la première l'extraction se poursuit régulièrement jusqu'à 80 p. 100 du $K_2O$ et semble dépendre du même rapport ($K/Na \neq 10^{-3}$) des ions en solution. Vers la fin du processus, le minéral plus ou moins évolué paraît plus sensible à la présence de potassium en solution ($K/Na \neq 10^{-4}$) et la vitesse de libération diminue.

Pour expliquer la progression de la réaction vers l'intérieur des feuillets, on ne peut pas en effet faire intervenir des équilibres simples et il semble que l'on doive invoquer à la fois une réaction d'échange d'ions et une microdiffusion.

C'est ce que confirme l'emploi de la méthode optique qui consiste à suivre en fonction du temps le déplacement de la frange d'hydratation des cations à l'intérieur

des cristaux (MEHMEL, 1938 ; WALKER, 1963 ; RAUSELL-COLOM *et al.*, 1965 ; WELLS et NORRISH, 1968). En reportant sur un graphique la distance parcourue en fonction de $\sqrt{t}$ on obtient en général une droite, ce qui est caractéristique d'un phénomène de diffusion.

b) *Principaux facteurs déterminant la réaction.*

— A la suite de ces essais, on peut admettre que tous les cations divalents peuvent remplacer le potassium. Par contre, des expériences avec $NH_4Cl$ montrent que les cations monovalents dont la taille avoisine ou dépasse celle de K, tels que $NH_4$, Cs et Rb (WELLS et NORRISH, 1965) bloquent la réaction.

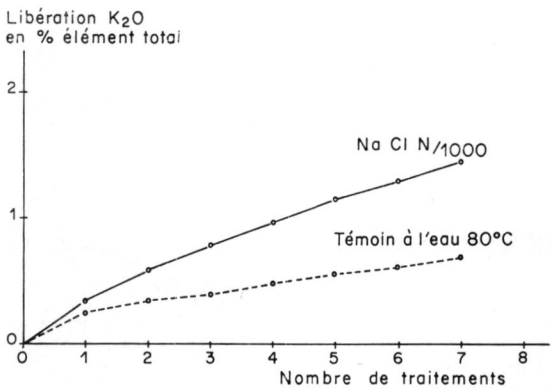



FIG. 2. — *Rôle de la concentration en NaCl sur la libération du $K_2O$ de la biotite*

— D'un autre côté, nous avions, lors des études effectuées sur granite, mis en évidence l'importance du facteur concentration des solutions. C'est pourquoi, nous avons repris sur mica, certaines expériences en utilisant une concentration plus faible (de l'ordre de $10^{-3}$ N en Na) : la libération de $K_2O$ n'a été que le double de celle provoquée par un traitement par de l'eau distillée (fig. 2). Il semble donc *qu'en dessous d'une certaine concentration de la solution, on ne puisse pratiquement plus parler d'un effet propre du sel.*

### 2. *Transformation minéralogique*

Simultanément, nous avons étudié l'évolution minéralogique : tous les produits obtenus avec les différents traitements montrent une évolution typique en vermiculite qui peut être caractérisée aussi bien par la diffraction des rayons X que par les analyses thermiques.

a) *Étude en diffraction X.*

Nous avons suivi l'évolution à l'aide d'un diffractomètre en étudiant les échantillons de mica présentant différents taux d'extraction du potassium (réalisés par l'action de NaCl N). On constate sur la figure 3 que, pour 15 p. 100 d'extraction du potassium, l'évolution est à peine décelable (apparition d'un petit pic à 12 Å) (1) ; par la suite à partir de 30 p. 100, ce pic commence à être net. A 45 p. 100,

(1) Si l'humidité est supérieure à 60 p. 100, le pic peut se trouver entre 12 et 14 Å ou même à 14 Å (VAN OLPHEN, 1964).

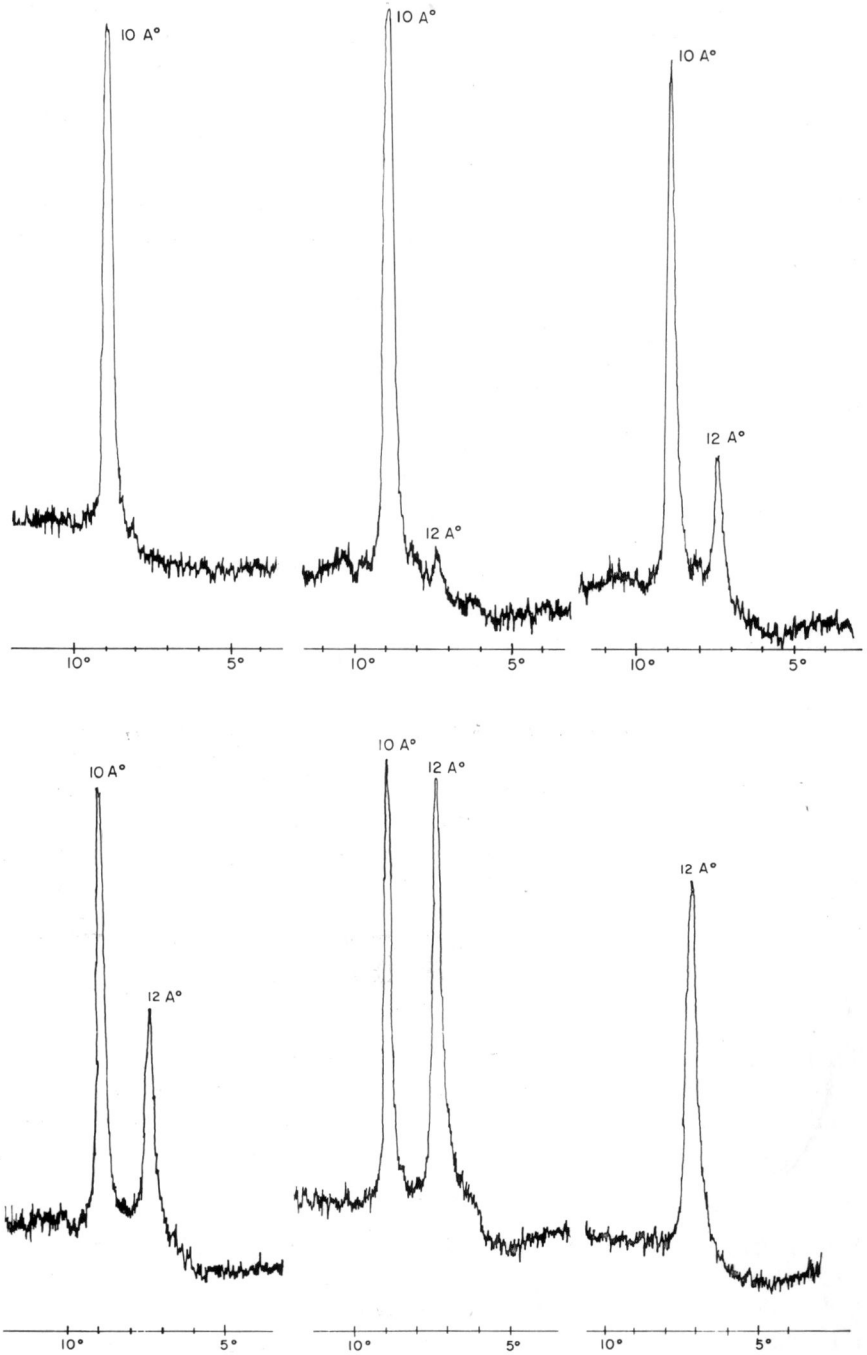



FIG. 3. — *Variation de l'équidistance 001 en fonction de taux d'extraction du potassium croissant*

De gauche à droite et de haut en bas :

0 p. 100 (biotite saine) ; 15 p. 100 ; 30 p. 100 ; 45 p. 100 ; 60 p. 100 ;
100 p. 100 (vermiculite Na)

la réflexion à 10 Å est encore la plus développée, mais le rapport ira en s'inversant au-dessus de 60 p. 100 d'extraction ; pour un taux de 100 p. 100 d'extraction, on ne distingue plus qu'un seul pic à 12 Å.

Il est à noter qu'au cours de cette expérience nous n'avons jamais mis en évidence d'édifices interstratifiés, ni réguliers type hydrobiotite avec la succession de feuillets à 10 Å et à 12 Å qui donnerait des réflexions rationnelles à 22 Å-11 Å,... ni même irréguliers conduisant à des réflexions irrationnelles. Il semble donc que de tels interstratifiés ne se soient pas formés expérimentalement en présence de solutions à concentration trop élevée ; d'après RAUSSEL-COLOM *et al.* (1965), ils pourraient être engendrés lors de traitements réalisés avec des solutions beaucoup moins concentrées ($< 10^{-3}$ N).

Enfin, pour caractériser l'évolution globale des produits, nous reproduisons ci-contre (fig. 4), un enregistrement effectué sur la biotite traitée par $MgCl_2$. Les différentes réflexions (00l) sont particulièrement visibles : la raie (002) à 14,25 Å traduit la présence de 2 couches d'eau interfoliaire liée aux cations Mg ; la raie (004) à 7,14 Å relativement rare dans les vermiculites naturelles est ici très visible.

Ce minéral qui ne gonfle pas au glycérol voit par contre son écartement fondamental revenir à 10 Å par chauffage à 400°C : il a donc un comportement de vermiculite.

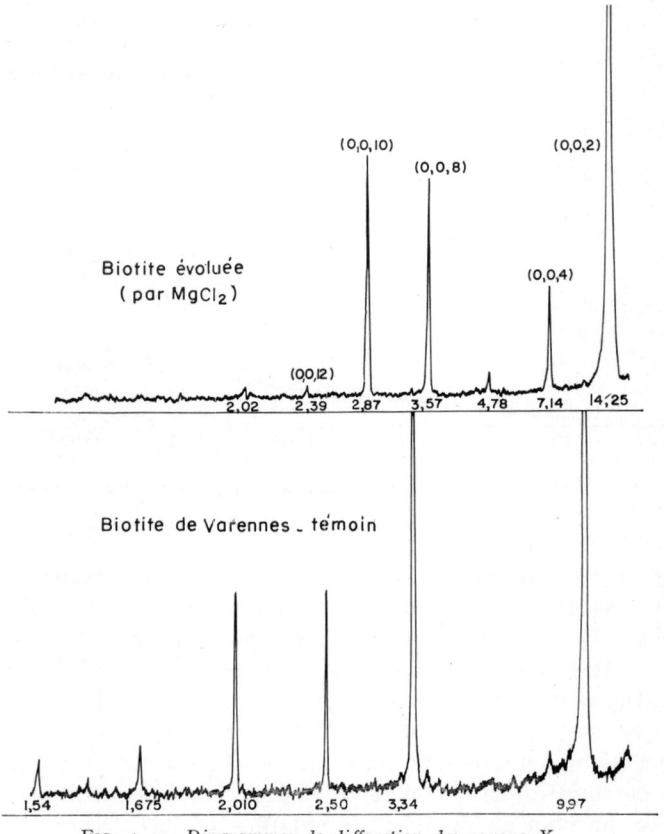



FIG. 4. — *Diagrammes de diffraction des rayons X*
(biotite saine et biotite traitée par $MgCl_2$)

b) *Études thermiques.*

Nous avons caractérisé aussi par thermogravimétrie l'évolution finale obtenue sur la biotite de Varennes au cours des différents traitements : on peut en particulier noter sur la figure 5 l'importance des gains en eau d'hydratation, obtenus par rapport au mica initial.

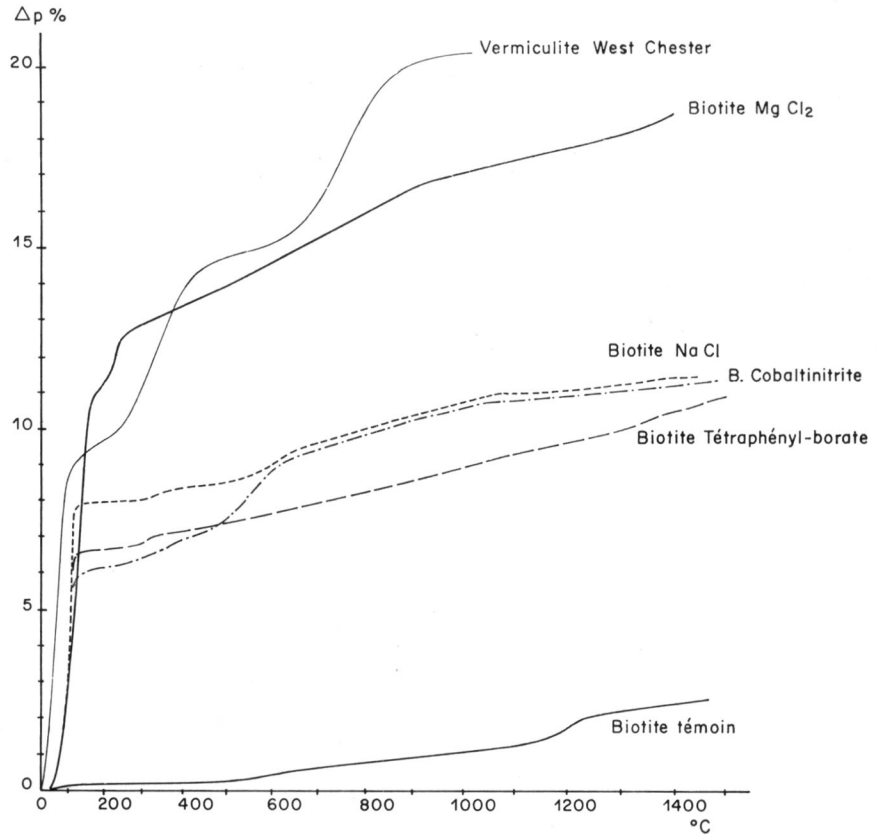



FIG. 5. — *Caractérisation thermopondérale des différents produits expérimentaux*

L'utilisation de l'analyse thermique différentielle vient confirmer cette évolution : la figure 6 représente 2 courbes caractéristiques des vermiculites expérimentales obtenues sous la forme Mg ou Na, par rapport au mica témoin.

On peut mettre ainsi en évidence entre 25°C et 300°C les pics endothermiques qui caractérisent le départ d'une ou deux couches d'eau interfoliaire.

De plus, sur toutes les courbes, il est à noter qu'à partir de 1 100°C s'amorce le départ d'un pic endothermique qui serait net vers 1 200°C. Ce pic qui apparaît comme étant caractéristique d'un matériel micacé de type trioctaédrique ($Fe^{2+}$ $Mg^{2+}$) correspond au phénomène de déshydroxylation (TSVETKOV et VALYASKIKHINA, 1956).

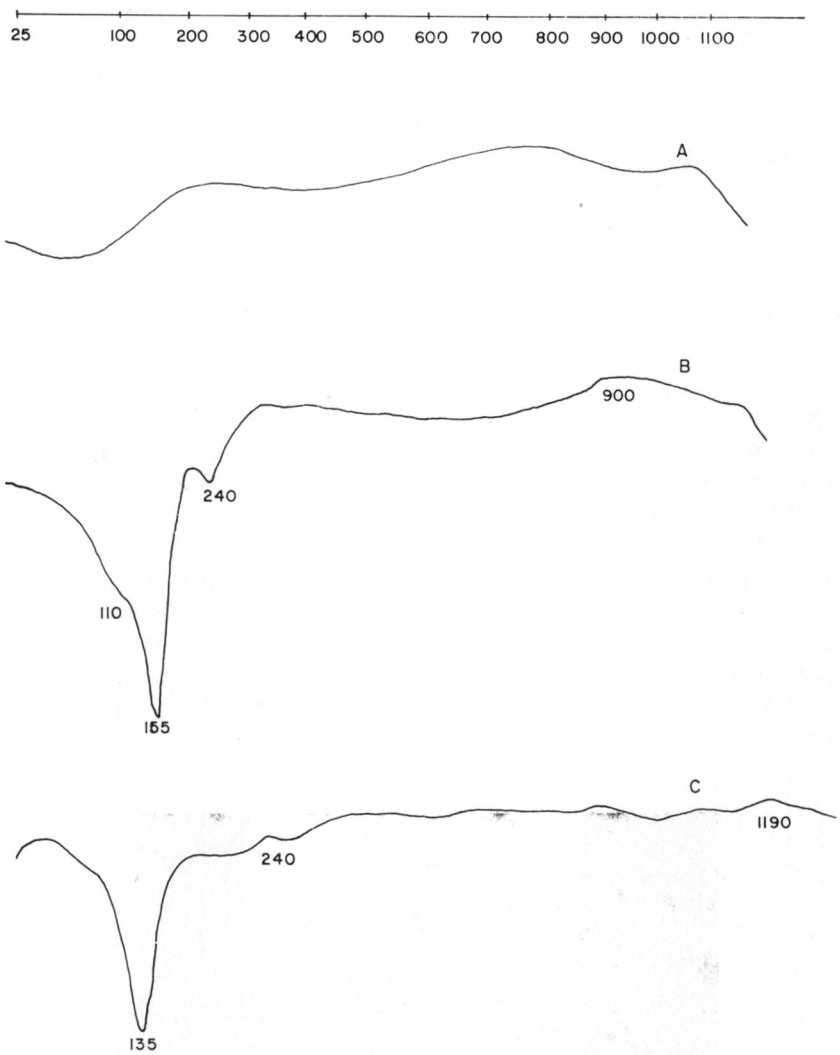



FIG. 6. — *Caractérisation par l'analyse thermique différentielle*
A — Biotite de Varennes
B — Biotite de Varennes traitée par $MgCl_2$ (vermiculite Mg)
C — Biotite de Varennes traitée par NaCl (vermiculite Na)

c) *Évolution des faciès morphologiques.*

— Nous avons tout d'abord complété les études macroscopiques et microscopiques concernant le gonflement des micas (1). Au microscope polarisant on peut constater une modification dans les teintes de polarisation (qui passent à des verts ou à des rouges violets) ; les indices de réfraction prennent alors les valeurs suivantes (tabl. 3) :

(1) Étude expérimentale de la désagrégation du granite.

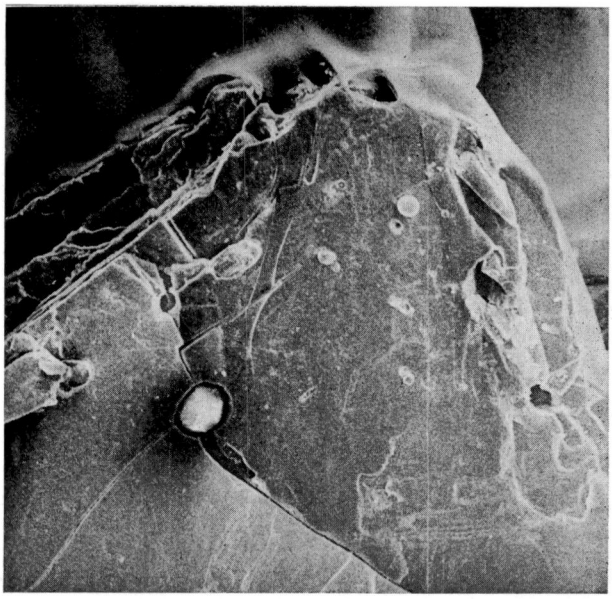
TABLEAU 3

*Variation de l'indice de réfraction* ($n\beta = n\gamma$)

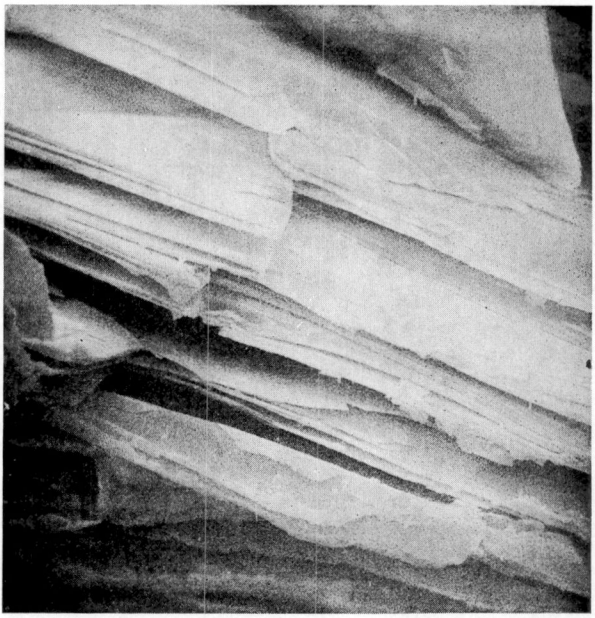
| Échantillon de biotite | Biotite de Varennes | Traitée par NaCl | Traitée par $MgCl_2$ | Traitée au cobaltinitrite | Vermiculite |
|---|---|---|---|---|---|
| Indice de réfraction | 1,632 | < 1,632 | 1,570 < $n$ < 1,590 | $n$ > 1,660 | 1,54-1,57 E. V. SHANNON (1928) |

On peut donc noter, pour les échantillons traités par des chlorures, que l'indice de réfraction tend ainsi à se rapprocher de celui des vermiculites naturelles ; toutefois il faut signaler la nette augmentation de l'indice de réfraction de l'échantillon traité au cobaltinitrite, augmentation probablement à relier à la forte oxydation du fer engendrée dans cet essai.

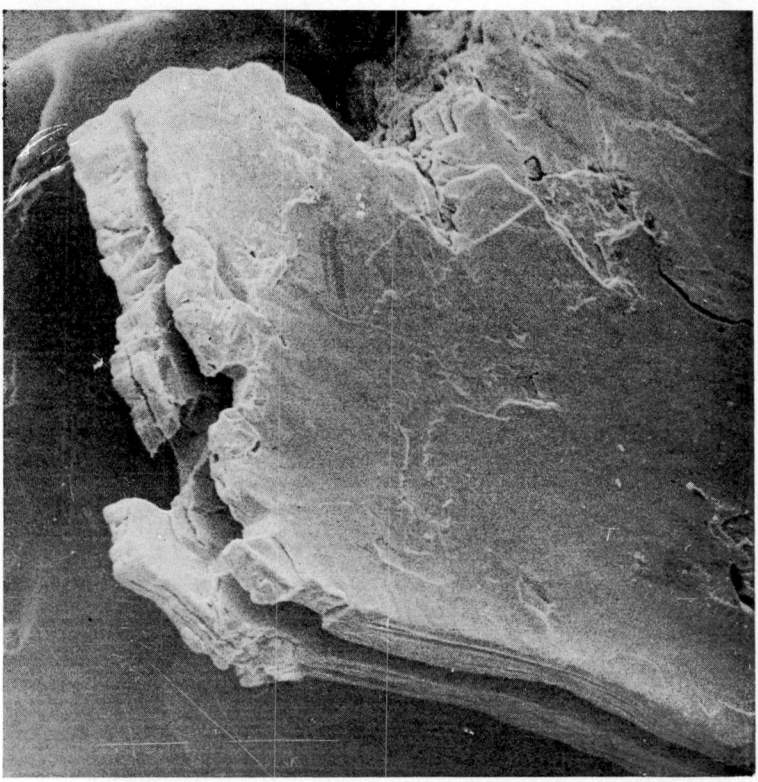
— Les études au microscope électronique classique (par transmission) se révèlent en général insuffisantes pour caractériser ce type de minéraux : d'une part, à cause de la petite taille exigée pour l'examen et d'autre part, du fait de l'absence de forme caractéristique développée suivant (001). La technique des répliques apporte une certaine amélioration ; mais elle ne met en évidence qu'une partie de la surface du minéral.



CLICHÉ 1. — *Biotite de Varennes nature. Surface des feuillets avec une inclusion* (grossissement 125)



CLICHÉ 2. — *Biotite de Varennes nature. Tranche de feuillet*
(grossissement 620)



CLICHÉ 3. — *Vermiculite obtenue par traitement* $MgCl_2$
(grossissement 120)

Cliché 4. — *Vermiculite obtenue par traitement* $MgCl_2$
(grossissement 1 150)

L'utilisation d'un microscope électronique à balayage s'est révélée, par contre, spécialement intéressante. En effet, ce type d'appareil qui permet sur un même échantillon d'utiliser des grossissements partant de 0 jusqu'à 40 000, présente également l'avantage par rapport au microscope électronique classique d'avoir une profondeur de champ considérable permettant d'examiner en particulier les empilements de feuillets.

Pour le mica non évolué, les feuillets, dont les bords sont nets, apparaissent empilés régulièrement (clichés 1 et 2). Lors de l'évolution en vermiculite, on distingue beaucoup moins aisément ces empilements et les bords apparaissent à la fois enroulés et gondolés (clichés 3 et 4). Cependant, aux grossissements utilisés, la surface des feuillets n'apparaît pas attaquée. (Nous verrons plus loin qu'il n'en est pas ainsi lors de l'évolution en présence de traitements plus agressifs).

### 3. *Évolution cristallochimique*

Si on ne considère que les données des spectres X ou des analyses thermiques, tous les traitements paraissent conduire à une évolution similaire du type mica → vermiculite.

Il était cependant nécessaire, pour comprendre le mécanisme, de réaliser un bilan chimique précis de l'évolution et de comparer ce bilan à celui que l'on peut

établir pour les vermiculites naturelles. Les analyses chimiques totales (voir tabl. 4) ont été effectuées et nous donnons dans les tableaux 5 et 6, les formules structurales et le bilan des charges qui en découlent.

TABLEAU 4

*Analyses chimiques en p. 100*

| | $B_1$ Biotite de Varennes Témoin (0,5-1 mm) (*a*) | $B_2$ Biotite traitée par NaCl (*b*) | $B_3$ Biotite traitée par $MgCl_2$ (*c*) | $B_4$ Biotite traitée au tétraphénylborate (*d*) | $B_5$ Biotite traitée au cobaltinitrite (*e*) |
|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ ..... | 36,92 | 35,37 | 33,12 | 35,61 | 35,78 |
| $Al_2O_3$ ..... | 14,69 | 13,76 | 13,05 | 14,43 | 13,37 |
| $Fe_2O_3$ ..... | 1,11 | 11,60 | 9,67 | 8,24 | 18,37 |
| FeO ..... | 17,74 | 7,71 | 8,50 | 10,00 | 1,68 |
| $TiO_2$ ..... | 3,94 | 3,78 | 3,66 | 3,60 | 3,81 |
| MgO ..... | 11,53 | 11,19 | 13,52 | 10,86 | 10,97 |
| MnO ..... | 0,35 | 0,31 | 0,33 | 0,29 | 0,28 |
| CaO (1) ... | 0,35 | 0,21 | 0,16 | 0,40 | 0,29 |
| $K_2O$ ..... | 8,55 | 0,04 | 0,06 | 0,13 | 0,06 |
| $Na_2O$ ..... | 0,31 | 4,40 | 0,15 | 4,70 | 4,40 |
| $H_2O_{1\,500°}$ .. | 2,52 | 10,72 | 18,00 | 10,20 | 10,76 |
| $P_2O_5$ ..... | 0,52 | 0,40 | 0,45 | 0,40 | 0,52 |
| CaO (2) ... | 0,68 | 0,52 | 0,60 | 0,52 | 0,69 |
| Total ..... | 99,21 | 100,01 | 101,21 | 99,38 | 100,98 |
| $F^-$ ..... | 0,15 | — | — | — | — |
| Apatite ... | 1,20 | 0,91 | 1,04 | 0,91 | 1,20 |

(1) CaO vrai.
(2) CaO sous forme de fluor apatite.

Ils ont été calculés en se basant sur une maille de mica contenant 11 oxygènes, donc sans tenir compte de l'eau et des hydroxyles. Il apparaît difficile en effet de réaliser un bilan suffisamment précis de ces OH par les seules analyses thermiques (FOSTER, 1960).

a) *Bilan global.*

En ce qui concerne les cations structuraux, si l'on effectue un bilan avant et après évolution, on peut dire que dans la limite des erreurs expérimentales et des conventions de calcul, le réseau n'a pas réellement été touché (1). Par contre, l'évolution s'accompagne d'une oxydation très nette du fer ferreux. *Cette oxydation apparaît comme étant très variable selon les réactifs utilisés : voisine de 40 p. 100 avec le tétraphénylborate, de 50 p. 100 pour les traitements aux chlorures, elle atteint 90 p. 100 avec le cobaltinitrite.*

(1) La seule variation qui puisse être décelée sur un tel bilan global porte sur une certaine extraction de cations octaédriques (Al-Mg) par le cobaltinitrite de sodium (qui avait un milieu plus acide). De plus on observe dans tous les cas une légère extraction de Si.

TABLEAU 5

*Formules structurales des biotites avant et après évolution*

| | |
|---|---|
| (*a*) Biotite de Varennes | $Ca_{0,03}K_{0,827}Na_{0,045}[(Al_{0,102}Ti_{0,223}Fe^{3+}{}_{0,062})(Fe^{2+}{}_{1,119}Mg_{1,300}Mn_{0,02})](Al_{1,207}Si_{2,793})O_{10}(OH)_2$ |
| (*b*) Traitée NaCl | $Ca_{0,017}K_{0,003}Na_{0,661}[(Al_{0,004}Ti_{0,220}Fe^{3+}{}_{0,677})(Fe^{2+}{}_{0,499}Mg_{1,295}Mn_{0,02})](Al_{1,254}Si_{2,746})O_{10}(OH)_2$ |
| (*c*) Traitée $MgCl_2$ | $Mg_{0,336}Ca_{0,013}K_{0,006}Na_{0,024}[(Ti_{0,226}Fe^{3+}{}_{0,551})(Fe^{2+}{}_{0,584}Mg_{1,333}Mn_{0,02})](Fe^{3+}{}_{0,007}Al_{1,266}Si_{2,727})O_{10}(OH)_2$ |
| (*d*) Traitée au tétraphénylborate | $Ca_{0,032}K_{0,013}Na_{0,724}[(Al_{0,092}Ti_{0,210}Fe^{3+}{}_{0,483})(Fe^{2+}{}_{0,649}Mg_{1,262}Mn_{0,018})](Al_{1,227}Si_{2,773})O_{10}(OH)_2$ |
| (*e*) Traitée au cobaltinitrite | $Ca_{0,023}K_{0,011}Na_{0,652}[(Ti_{0,22}Fe^{3+}{}_{0,981})(Fe^{2+}{}_{0,107}Mg_{1,247}Mn_{0,017})](Fe^{3+}{}_{0,072}Al_{1,207}Si_{2,728})O_{10}(OH)_2$ |

TABLEAU 6

*Bilan des charges*

| Échantillons | Biotite témoin (*a*) | Biotite NaCl (*b*) | Biotite $MgCl_2$ (*c*) | Biotite tétraphényl-borate (*d*) | Biotite cobalti-nitrite (*e*) |
|---|---|---|---|---|---|
| Déficit de charge tétraédrique.. | — 1,20 | — 1,25 | — 1,27 | — 1,23 | — 1,27 |
| Excès de charge octaédrique... | + 0,26 | 0,54 | 0,53 | + 0,42 | + 0,56 |
| Charge théorique du feuillet ... | + 0,94 | 0,71 | 0,74 | 0,81 | 0,71 |
| Charge des espaces interfoliaires | + 0,93 | 0,70 | 0,73 | 0,80 | + 0,70 |
| Abaissement de la charge interfoliaire ..... | 0 | 0,23 | 0,20 | 0,13 | 0,29 |
| Abaissement de la charge correspondant théoriquement à l'oxydation observée..... | 0 | 0,61 | 0,56 | 0,42 | 0,99 |

Mais les transformations les plus fondamentales ont porté sur les cations interfoliaires et c'est ainsi que le potassium entièrement libéré a été remplacé selon les traitements, soit par du sodium, soit par du magnésium. Point important toutefois : la teneur en cations montre un déficit correspondant à un abaissement de la charge interfoliaire. Celle-ci devient voisine de 0,70 pour $Si_4O_{10}$ (tabl. 6) et se place de ce fait dans la zone des vermiculites classiques (FOSTER, 1960).

A l'aide de ces formules structurales, on peut d'ailleurs évaluer les valeurs théoriques de la capacité d'échange en les rapportant au poids moléculaire de la maille. Dans le tableau 7, nous avons reporté ces données en les comparant à des valeurs directement mesurées par échange. On constate que la charge, qui a une valeur de 182 méq. en K au départ (non échangeable) passe à des valeurs de 140 à 160 méq. de Na ou Mg (échangeables) dans les minéraux évolués. Ces valeurs sont assez caractéristiques pour des minéraux de type vermiculite et confirment l'abaissement de charge décelé au niveau des formules structurales.

TABLEAU 7

*Valeurs des capacités d'échange en milliéquivalents/100 g*
(biotite de Varennes traitée par différents réactifs)

| | | B NaCl | B $MgCl_2$ | B Tétraphénylborate | B Cobaltinitrite | Biotite de Varennes au départ (charge) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeurs théoriques calculées sur $Si_4O_{10}$ (calciné) | | 153 | 157 | 167 | 151 | $K_2O$ 182 méq. calciné 186 |
| Valeurs mesurées | Hydraté | 149 | 134 | 139 | 116 | |
| | Calciné 1 500°C | 167 | 163 | 155 | 130 | |

b) *Essai d'interprétation.*

Avec le minéral utilisé, la biotite de Varennes riche en $Fe^{2+}$, l'ouverture consécutive à l'échange des cations interfoliaires (processus de vermiculitisation) s'accompagne donc d'un abaissement de la charge interfoliaire. A ce sujet, il est intéressant de se référer à 2 hypothèses classiquement citées :

— Barshad (1948) pense que la vermiculitisation résulte d'un simple échange de cations interfoliaires : le remplacement doit donc se faire cation par cation ou charge pour charge.

— Gruner (1934) au contraire laissait supposer une intervention de réactions d'oxydation dans le déclenchement même de la vermiculitisation : l'évolution serait en effet, produite sous l'action de l'oxydation du fer ferreux qui provoquerait l'expulsion concomitante du potassium.

Or, dans nos expériences, on s'aperçoit que si toute l'évolution a paru suivre le mécanisme supposé par Barshad, le résultat final sur le plan du bilan des charges n'est pas conforme à celui qu'on pourrait attendre dans ce cas.

Il serait tentant alors de faire intervenir la 2e hypothèse. Mais on constate (tabl. 6) que si l'oxydation se répercutait complètement sur la charge, celle-ci serait de 0,50 pour un taux d'oxydation de 40 p. 100 (tétraphénylborate) et deviendrait nulle pour une oxydation à 90 p. 100 (cobaltinitrite). Or, ce n'est pas le cas. Il n'apparaît donc pas possible pour l'instant d'interpréter de tels résultats en se référant exclusivement soit à l'une soit à l'autre de ces 2 hypothèses et nous examinerons ce problème ultérieurement.

## B. — Vermiculitisation d'un mica-phlogopite

Étant donné l'importance qui peut être attribuée à l'oxydation du fer dans le processus de vermiculitisation, il nous a semblé nécessaire de compléter cette première étude à l'aide de quelques essais comparatifs effectués à partir d'un mica du

type phlogopite, c'est-à-dire pauvre en $Fe^{2+}$ (FeO voisin de 3 p. 100). Les conditions expérimentales sont d'ailleurs celles que nous avons décrites précédemment ; nous avons repris de plus la même présentation des résultats.

### 1. — *Libération du potassium*

Nous avons reporté dans la figure 7, les courbes de libération obtenues avec NaCl N et le cobaltinitrite de Na : elles sont du même type que dans le cas de la biotite.

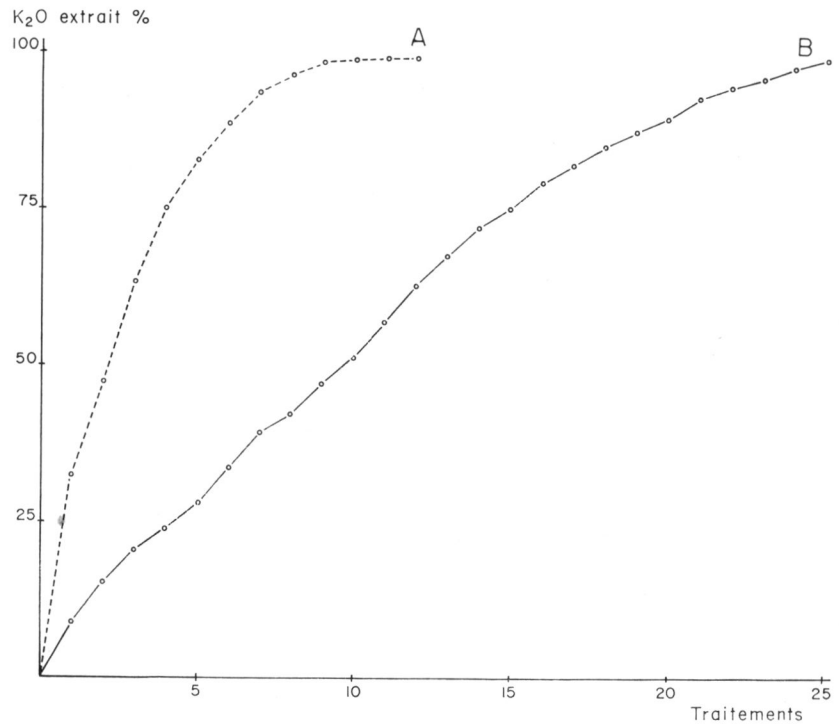



FIG. 7. — *Extraction du potassium par différents traitements :*
A — Cobaltinitrite de Na
B — NaCl N

*La quantité de fer ferreux présent dans le minéral n'apparaît donc pas comme un facteur prépondérant quant au problème de la sortie du potassium.*

Les réactifs utilisés conduisent ainsi tous les deux à une extraction quasi totale du $K_2O$.

### 2. — *Étude minéralogique*

— *Caractérisation à l'aide des rayons X.* Pour la biotite, nous avions utilisé des enregistrements de spectres effectués sur produits orientés, où les réflexions (001) sont particulièrement mises en évidence. L'utilisation de poudres avec la méthode photographique permet, par contre, un examen détaillé et complet du spectre. Nous avons reporté dans le tableau 8 le dépouillement de films concernant la phlogopite témoin, la phlogopite traitée au cobaltinitrite rendue Mg et en référence la vermiculite de West-Chester (WALKER, 1961).

TABLEAU 8

*Spectres de rayons X*

| Phlogopite | Produit final | Vermiculite West Chester |
|---|---|---|
| | | 14,4 (TF) 002 |
| | 14,28 (F) | |
| 10,06 (TF) | | |
| | 7,14 | 7,20 (*tf*) 004 |
| | | 4,79 (*tf*) 006 |
| 4,59 (F) | 4,59 (TF) | 4,60 (*f*) 020,110 |
| 3,91 (*f*) | | |
| 3,66 (*mf*) | | |
| | 3,56 (*f*) | 3,58 (*m*) 008 |
| 3,36 (F) | | |
| 3,14 (*f*) | 3,16 (*tf*) | |
| | 2,95 (*tf*) | |
| 2,91 (*mf*) | | |
| | 2,86 (*m*) | 2,87 (*m*) |
| | 2,83 (*f*) | |
| 2,69 | | |
| | 2,65 (TF) | 2,65 (*m*) 130,200 |
| 2,62 (TF) | 2,59 (F) | 2,59 (*m*) 132,204 |
| | 2,55 (F) | 2,55 (*m*) 134,202 |
| 2,51 (*f*) | | |
| 2,44 (F) | 2,43 (*m*F) | |
| | 2,39 (F) | 2,39 00,12 |
| 2,29 (*f*) | | 136,204 |
| | 2,22 (*f*) | 2,21 (*f*) 138,206 |
| 2,18 (F) | 2,19 (*f*) | |
| | 2,07 (*f*) | 2,08 (*f*) 138,201 0 |
| | | 2,05 (*f*) 0 014 |
| 2,02 (*m*F) | 2,02 (*f*) | 2,01 (*f*) 208 |
| 1,91 (*tf*) | | |
| 1,86 (*tf*) | 1,86 (*tf*) | 1,83 (*f*) |
| 1,79 (*tf*) | 1,74 (*mf*) | 1,74 (*f*) 2 014 |
| 1,70 (*m*F) | 1,70 (*m*F) | |
| 1,68 (*m*F) | 1,68 (*m*F) | 1,67 (*f*) 1 314,201 2 |
| 1,55 (TF) | 1,55 (TF) | 1,54 (F) 060 |

On constate pour les micas traités, que si toutes les réflexions (00*l*) d'une vermiculite sont présentes, on retrouve également la plupart des raies (*h k l*) :

— en particulier une réflexion intense à 2,39 Å (et des raies moins intenses à 2,86-2,07 et 1,74 Å) ;

— et un triplet caractéristique à :

2,65<br>2,59<br>2,55 } à la place de la raie unique à 2,62 de la phlogopite.

— *En ce qui concerne les analyses thermiques,* nous disposions avec la phlogopite d'un matériel expérimental plus abondant. Aussi nous avons essayé de saisir des étapes intermédiaires de l'évolution en procédant à une étude thermogravimétrique des différents produits obtenus. On s'aperçoit en examinant la figure 8, que

des extractions relativement faibles en potassium (17 p. 100 par exemple), se décèlent immédiatement par une augmentation de l'eau d'hydratation. Puis, au fur et à mesure que l'extraction du potassium progresse, on note que la teneur en eau d'hydratation liée aux cations interfoliaires continue de croître.

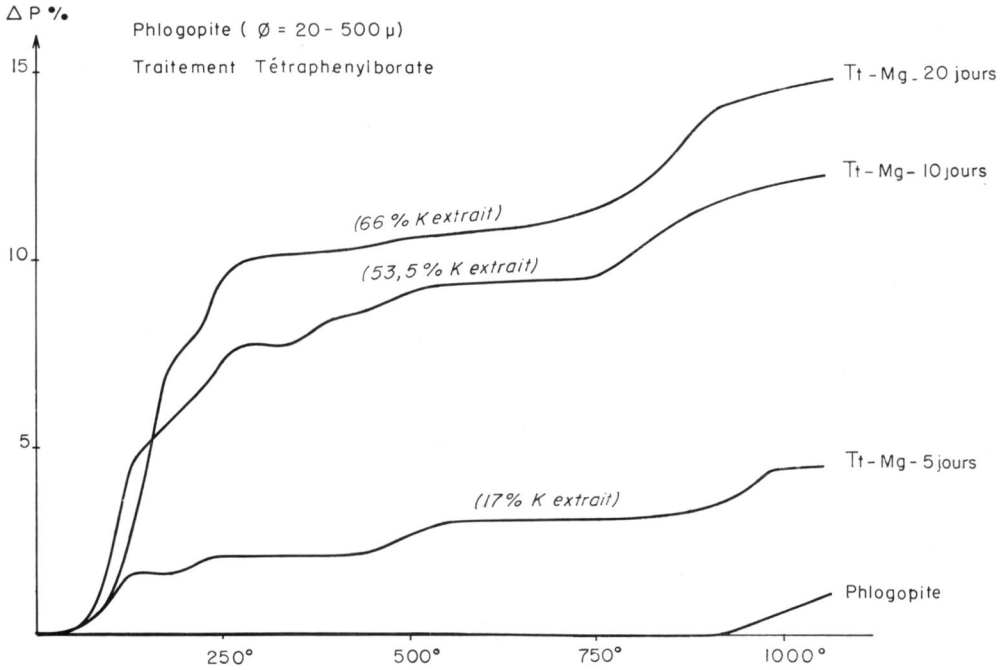



FIG. 8. — *Caractérisation thermogravimétrique d'une phlogopite traitée au tétraphénylborate de sodium puis rendue magnésienne*

La méthode thermopondérale est donc une méthode assez fine qui permet de déceler l'évolution des micas, par extraction du potassium, et de la suivre jusqu'à une transformation totale en vermiculite.

### 3. — *Évolution cristallochimique*

Nous avons reporté dans les tableaux 9, 10 et 11, l'analyse totale des phlogopites évoluées, les formules structurales qui peuvent en être déduites avec référence à la phlogopite de départ, et un tableau récapitulatif sur le bilan des charges au niveau de la maille. On constate comme lors de la vermiculitisation de la biotite, le maintien de l'intégralité des couches tétraédriques et octaédriques, et une certaine oxydation du fer ferreux. L'abaissement de la charge s'observe toujours, mais cette fois il est au moins égal et en général supérieur à celui qui pourrait être provoqué par l'oxydation. Il semble donc se passer autre chose sur le plan de la compensation des charges et différents auteurs (RAMAN et JACKSON, 1966 ; NEWMAN et BROWN, 1966 ; NEWMAN, 1967), ont suggéré, pour expliquer ce fait, la possibilité d'une augmentation des charges négatives au cours de la vermiculitisation, localisée au niveau de la couche anionique.

TABLEAU 9

*Analyses chimiques totales*

| Échantillons | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $TiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | MgO | MnO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | Perte au feu | $F^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Phlogopite nature. | 38,30 | 17,42 | 1,15 | 2,37 | 3,05 | 23,60 | 0,27 | 0,38 | 0,41 | 9,80 | 3,98 | 0,60 |
| Phlogopite (NaCl). | 36,33 | 17,07 | 1,03 | 3,38 | 1,94 | 22,64 | 0,19 | 0,25 | 5,95 | 0,04 | 13,70 | — |
| Phlogopite (cobaltinitrite) ..... | 36,21 | 17,06 | 1,13 | 4,16 | 1,15 | 22,72 | 0,19 | 0,25 | 5,37 | 0,35 | 14,70 | — |

TABLEAU 10

*Formules structurales de la phlogopite et des produits évolués*

| | |
|---|---|
| P Madagascar | $Ca_{0,028}K_{0,878}Na_{0,005}\,[(Al_{0,126}Ti_{0,06}Fe^{3+}_{0,124})(Fe^{2+}_{0,177}Mg_{2,468}Mn_{0,016})]\,(Al_{1,312}Si_{2,688})O_{10}(OH_{1,86}F_{0,14})$ |
| P NaCl | $Ca_{0,02}K_{0,035}Na_{0,846}\,[(Al_{0,144}Ti_{0,008}Fe^{3+}_{0,189})(Fe^{2+}_{0,119}Mg_{2,479}Mn_{0,01})]\,(Al_{1,332}Si_{2,668})O_{10}(OH_{1,86}F_{0,14})$ |
| P C | $Ca_{0,02}K_{0}{}'_{032}Na_{0,765}\,[(Al_{0,139}Ti_{0,06}Fe^{3+}_{0,229})(Fe^{2+}_{0,07}Mg_{2,49}Mn_{0,01})]\,(Al_{1,338}Si_{2,662})O_{10}(OH_{1,86}F_{0,14})$ |

TABLEAU 11

*Bilan des charges*

| | Déficit tétraédrique | Excès de charge octaédrique | Charge du feuillet | Charge interfoliaire | Abaissement constaté | Abaissement théorique (oxydation) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P ..... | — 1,312 | + 0,31 | + 1,00 | + 0,99 | — | |
| P NaCl . | — 1,33 | + 0,43 | + 0,90 | + 0,90 | 0,09 | 0,08 |
| P C .... | — 1,34 | + 0,50 | + 0,84 | + 0,84 | 0,15 | 0,11 |

Ces différents essais de vermiculitisation posent finalement un certain nombre de problèmes ayant trait en particulier aux relations entre l'oxydation et la vermiculitisation. Nous envisagerons ce problème essentiel dans une deuxième partie. Mais auparavant il nous a semblé nécessaire, étant donné la grande variété de composition des micas, d'essayer de caractériser le comportement de quelques échantillons de types différents.

### C. — Extension sommaire a d'autres types de micas

Nous avons étudié jusqu'ici en détail l'évolution de deux micas trioctaédriques : une biotite et une phlogopite. Sans vouloir faire d'examen systématique, il était intéressant toutefois de tester d'autres micas et en particulier des édifices ayant une constitution cristallochimique différente.

Le réactif au cobaltinitrite de sodium apparaît comme étant le plus efficace : nous l'avons utilisé comme traitement de référence pour comparer l'aptitude des différents micas à céder leur K. Nous l'avons appliqué à une série de micas ou phyllites de type mica dont les formules structurales sont données dans le tableau 2. Les réactions des différents minéraux vis-à-vis de ce test ont été reportées sur la figure 9. On voit immédiatement que la libération de $K_2O$ (exprimée en p. 100 du $K_2O$ total) est très différente :

— tout d'abord parmi les minéraux trioctaédriques, l'aptitude à libérer le potassium varie de 52 p. 100 pour la biotite de Mazataud, à plus de 95 p. 100 pour la phlogopite de Madagascar (ou pour la biotite de Varennes) ;

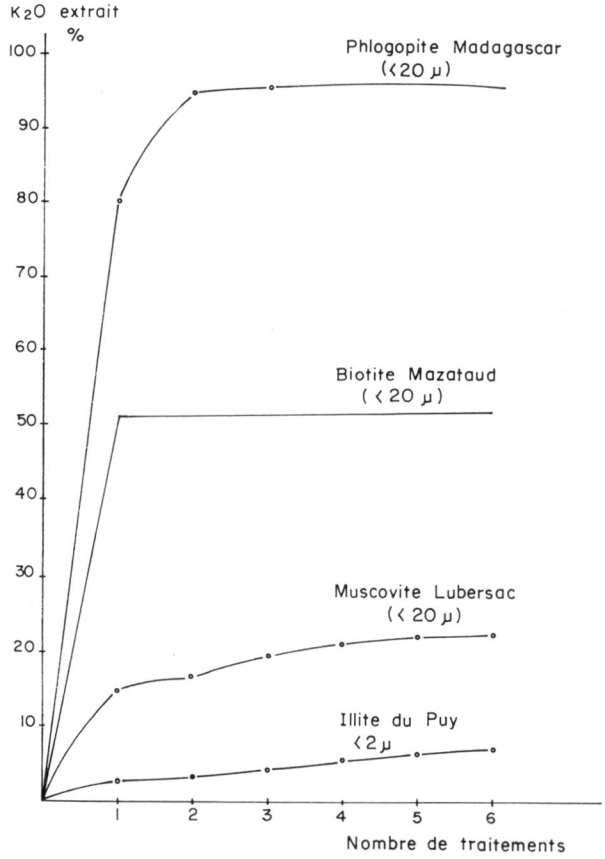



Fig. 9. — *Test au cobaltinitrite appliqué à différents minéraux micacés*

— les minéraux dioctaédriques se distinguent aisément des micas trioctaédriques, car leur réaction à ce test est très faible. Tout se passe comme si la sensibilité des minéraux dioctaédriques vis-à-vis du potassium en solution était beaucoup plus grande, ce qui se traduit par un blocage de la réaction beaucoup plus aisé que pour les micas trioctaédriques.

Ils se distinguent néanmoins entre eux et, par exemple, l'illite du Puy ($< 2\ \mu$) cède moins facilement son potassium que la muscovite pourtant en cristaux de plus grande taille (fait constaté également par Scott, 1968).

Ce test nous conduit donc à un classement relatif des minéraux quant à leur aptitude à libérer leur potassium, donc à vermiculitiser. Mais, il s'avère fondamental de savoir à quoi correspond ce classement, et en particulier si on peut faire une corrélation avec la composition cristallochimique des micas.

Besson *et al.* (1966) ont montré en utilisant ce test sur différents micas, que l'on ne pouvait pas faire de corrélation avec la composition tétraédrique et en particulier avec le taux de substitution de Si par Al.

Par contre, les premiers résultats des expériences que nous venons d'exposer, nous conduisent à établir une liaison très nette entre la constitution octaédrique des micas et leur aptitude à vermiculitiser.

Nous allons d'ailleurs être amenés à insister sur ces résultats en étudiant l'oxydation des micas.

## Conclusion

A l'aide de ces données expérimentales nous nous contenterons maintenant, en guise de conclusion, de dégager un certain nombre d'éléments essentiels quant à la réalisation d'une telle évolution vermiculitisante, et de voir dans quelle mesure ils sont susceptibles d'intervenir dans le milieu naturel.

Un élément prépondérant a été mis en évidence par l'application du test au cobaltinitrite : chaque mica selon sa composition cristallochimique et tout particulièrement selon l'occupation de sa couche octaédrique, aura un comportement qui lui est propre et donc une aptitude à vermiculitiser qui est caractéristique.

C'est ainsi que les vermiculites trouvées en macrocristaux dans le milieu naturel proviendront essentiellement de phlogopites ou de biotites magnésiennes (Foster, 1963). Cela correspond bien d'ailleurs aux différentes évolutions naturelles évoquées par divers auteurs (Lacroix, 1940 ; Walker, 1949 ; Hénin et Caillère, 1953 ; Bassett, 1963 ; Smith Aitken, 1965).

Indépendamment de cette caractéristique plus ou moins favorable du mica de départ, l'élément déterminant de l'évolution concerne évidemment la nature des solutions d'attaque et surtout leur concentration en cations, qui peut seule être à l'origine de la mise en œuvre d'une réaction d'échange. Il est donc aisé d'imaginer un certain nombre de situations dans le milieu naturel où des concentrations en Mg, Ca, Na seront suffisantes pour provoquer une telle évolution.

— Ce sera par exemple le cas au contact des roches basiques ou ultrabasiques en évolution (serpentinisation) où l'on observera bien la formation de vermiculites (Pulou, 1962 ; Forestier, 1964 ; Fortune *et al.*, 1968). Notons d'ailleurs que la majorité des vermiculites inventoriées ont des cations Mg en positions interfoliaires.

— Le voisinage de roches riches en calcium ou la présence d'un milieu calcaire sera également très favorable car l'évolution pourra se produire par l'action par exemple de Ca $(HCO_3)_2$. On peut citer à ce sujet l'évolution des minéraux argileux 2/1 obtenus dans ces conditions au sein du lœss (GLENN *et al.*, 1960).

— Par contre, si les solutions riches en sodium sont particulièrement abondantes dans le milieu naturel (milieu marin, lagunaire, ou continental endoréique), elles contiennent presque toujours du potassium en quantité suffisante pour bloquer une évolution vermiculitisante.

Au demeurant, si la vermiculitisation paraît résulter de réaction de type échange d'ions ou microdiffusion comme le pensait BARSHAD, elle s'accompagne toujours d'une oxydation, de telle sorte que les transformations globales obtenues portent non seulement sur les espaces interfoliaires, mais également sur la composition de la couche octaédrique et la constitution anionique des micas. Il s'avérait donc indispensable, pour mieux comprendre les phénomènes de compensation des charges au niveau du feuillet, d'entreprendre une étude plus détaillée des phénomènes d'oxydation et de préciser exactement leur place dans le problème de la vermiculitisation des micas.

## II. — OXYDATION SÉLECTIVE DES MICAS ET VERMICULITISATION

Les nombreux géologues ou minéralogistes qui se sont intéressés au comportement des micas dans la nature ont eu très vite leur attention attirée par les changements de couleur (mordorisation) qui accompagnent toujours ce type d'évolution. RINNE (1911-1924) a le premier dénommé « baueritisation » ce phénomène ; il l'a relié à l'oxydation du fer. Il a d'ailleurs réalisé cette réaction expérimentalement en chauffant les micas à forte température (1 000°C). MEHMEL (1938), puis TSVETKOV (1956), ont par la suite confirmé les premiers résultats.

Nous nous sommes donc basés sur ces travaux pour préparer, dans un premier temps, des micas oxydés de constitution connue, notre but étant, dans un deuxième temps, de tester leur aptitude à l'ouverture.

### A. — ÉTUDE DE L'OXYDATION DES BIOTITES PAR VOIE THERMIQUE, LEUR APTITUDE A L'OUVERTURE

#### 1. — *Étude globale de l'évolution*

a) *Préparation et constitution des biotites oxydées thermiquement.*

Le chauffage a été réalisé au sein d'un four aéré (vitesse de chauffe 150°C/heure). Les essais ont porté sur 2 biotites riches en FeO (biotite de Mazataud 20,02 p. 100; biotite de Varennes 17,74 p. 100), mais dont la première contient du fluor (tabl. 12, lignes *a* et *c*).

Les variations de l'état d'oxydation du fer au cours du chauffage, ont été mesurées par des dosages de fer ferreux. Les résultats obtenus ont été reportés sur un graphique (fig. 10).

TABLEAU 12

*Constitution des micas avant et après évolution* (1)

| Échantillons | | Formules structurales |
|---|---|---|
| Biotite de Mazataud | État frais (*a*) | $Ca_{0,042}K_{0,896}Na_{0,055}[(Al_{0,681}Ti_{0,142}Fe^{3+}{}_{0,044})(Fe^{2+}{}_{1,287}Mg_{0,377}Mn_{0,04})](Al_{1,247}Si_{2,753})O_{10}[(OH)_{1,60}F_{0,40}]$ |
| | Après chauffage à 800°C (*b*) | $Ca_{0,042}K_{0,896}Na_{0,055}[(Al_{0,681}Ti_{0,142}Fe^{3+}{}_{1,09})(Fe^{2+}{}_{0,24}Mg_{0,377}Mn_{004})](Al_{1,247}Si_{2,753})O_{11,05}[(OH)_{0,55}F_{0,40}]$ |
| Biotite de Varennes | État frais (*c*) | $Ca_{0,03}K_{0,827}Na_{0,04}[(Al_{0,102}Ti_{0,223}Fe^{3+}{}_{0,06})(Fe^{2+}{}_{1,119}Mg_{1,30}Mn_{0,02})](Al_{1,207}Si_{2,793})O_{10}(OH)_2$ |
| | Après chauffage à 800°C (*d*) | $Ca_{0,03}K_{0,827}Na_{0,04}[(Al_{0,102}Ti_{0,223}Fe^{3+}{}_{1,179})(Mg_{1,30}Mn_{0,02})](Al_{1,207}Si_{2,793})O_{11,11}(OH)_{0,89}$ |
| | Après extraction du potassium (*e*) (traitem. NaCl) | $Ca_{0,017}K_{0,003}Na_{0,661}[(Al_{0,004}Ti_{0,220}Fe^{3+}{}_{0,677})(Fe^{2+}{}_{0,499}Mg_{1,295}Mn_{0,02})](Al_{1,254}Si_{2,746})O_{10}(OH)_2$ |
| | Après traitement NaCl et (*f*) traitement $H_2O_2$ | $Ca_{0,017}K_{0,003}Na_{0,45}[(Al_{0,004}Ti_{0,220}Fe^{3+}{}_{1,10})(Fe^{2+}{}_{0,07}Mg_{1,295}Mn_{0,02})](Al_{1,254}Si_{2,746})O_{10,10}(OH)_{1,80}$ |
| | Échant. altéré dans le milieu (*g*) naturel (arène) | $Ca_{0,01}K_{0,724}Na_{0,038}[(Al_{0,187}Ti_{0,229}Fe^{3+}{}_{0,460})(Fe^{2+}{}_{0,628}Mg_{1,12}Mn_{0,016})](Al_{1,173}Si_{2,827})O_{10}(OH)_2$ |

(1) Formule structurale calculée au départ sur la base de 11 oxygènes dans le minéral calciné et en se référant à une couche tétraédrique inchangée pour les échantillons oxydés.

L'examen de ces données fait ressortir tout d'abord la relative stabilité thermique des ions $Fe^{2+}$, puisqu'il faut atteindre 600°C pour que l'oxydation se manifeste ; elle s'effectue alors très rapidement entre 600 et 800°C, mais si, à cette dernière température, elle est complète dans le cas de la biotite de Varennes, une partie du fer persiste encore à l'état ferreux jusqu'à 1 100°C dans l'échantillon de Mazataud. Au cours de cette évolution comme l'avait noté RINNE, la couleur des échantillons passe du noir au brun-rouge.

Les biotites chauffées à la température de 800°C ont été examinées aux rayons X. Il apparaît que la structure originelle est conservée avec simplement une légère contraction du réseau, en particulier du paramètre *b*, ce qui correspond à la présence d'une plus grande teneur en $Fe^{III}$ au sein de la couche octaédrique (RADOSLOVICH, 1962). Parallèlement, les mesures d'indice de réfraction font apparaître une augmentation très nette de *n* (*n* passant de 1,632 à une valeur supérieure à 1,880). Ce fait est également en relation avec la constitution de la couche octaédrique (MULLER, 1966 ; RIMSAITE, 1967).

Pour mieux caractériser les états successifs obtenus au cours du chauffage, nous avons utilisé en outre la thermogravimétrie et la spectroscopie infrarouge. En suivant sur des plaques de biotite (Mazataud par exemple) la modification du

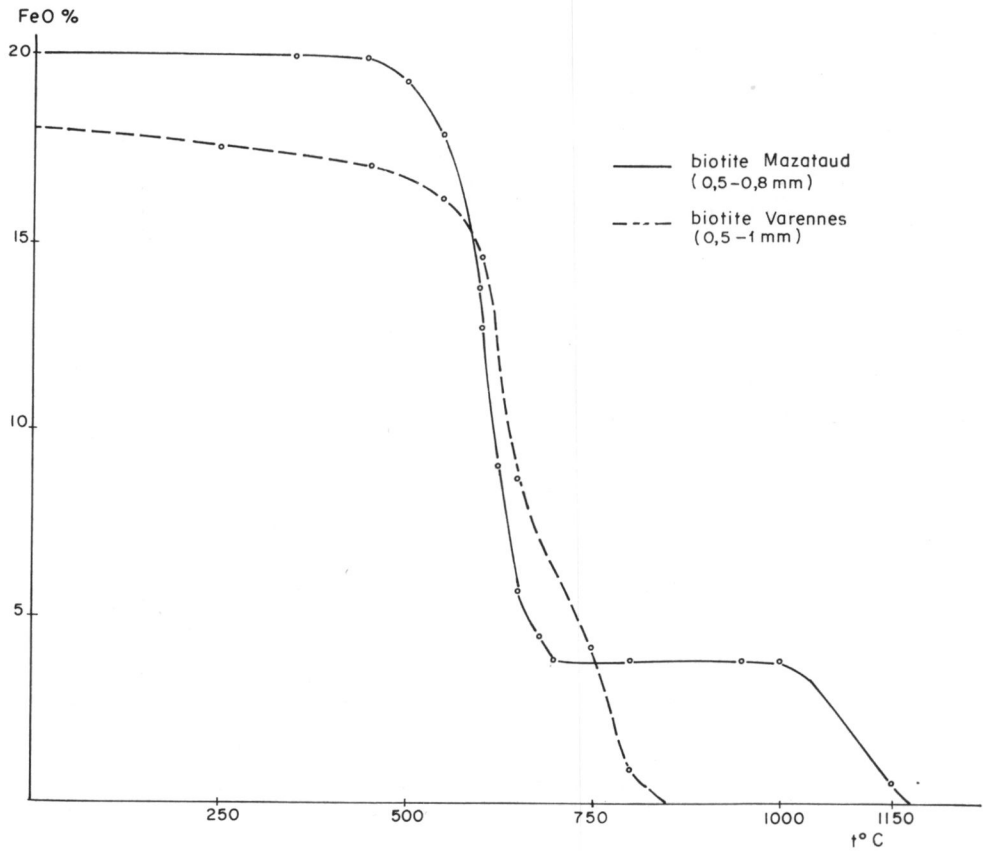



FIG. 10. — *Oxydation du fer ferreux au cours du chauffage*

spectre dans la zone 3 000-3 800 $cm^{-1}$, qui est celle des vibrations de valence des OH du réseau, en fonction de l'élévation de la température, nous avons pu vérifier que l'oxydation allait de pair avec une diminution de la teneur en hydroxyles (fig. 11), sans pour autant que les courbes thermopondérales fassent apparaître une perte de poids correspondant à un départ d'eau. De même, des expériences réalisées avec un chauffage *sous vide* ont pu montrer que l'oxydation n'était pas inhibée. La réaction qui se produit, semble donc s'établir indépendamment de l'oxygène de l'air et peut s'écrire sous la forme :

$$\underbrace{Fe^{2+} + OH^-}_{\text{réseau}} \rightarrow \underbrace{Fe^{3+} + O^{2-}}_{\text{réseau}} + H$$

Le processus d'oxydation thermique des micas apparaît finalement comme un phénomène *interne* et se rapproche ainsi de celui qui peut affecter d'autres silicates hydroxylés comme les chlorites (ORCEL et RENAUD, 1941 ; BRINDLEY et YOUELL, 1953) ou encore les amphiboles (ADDISON et SHARP, 1962).

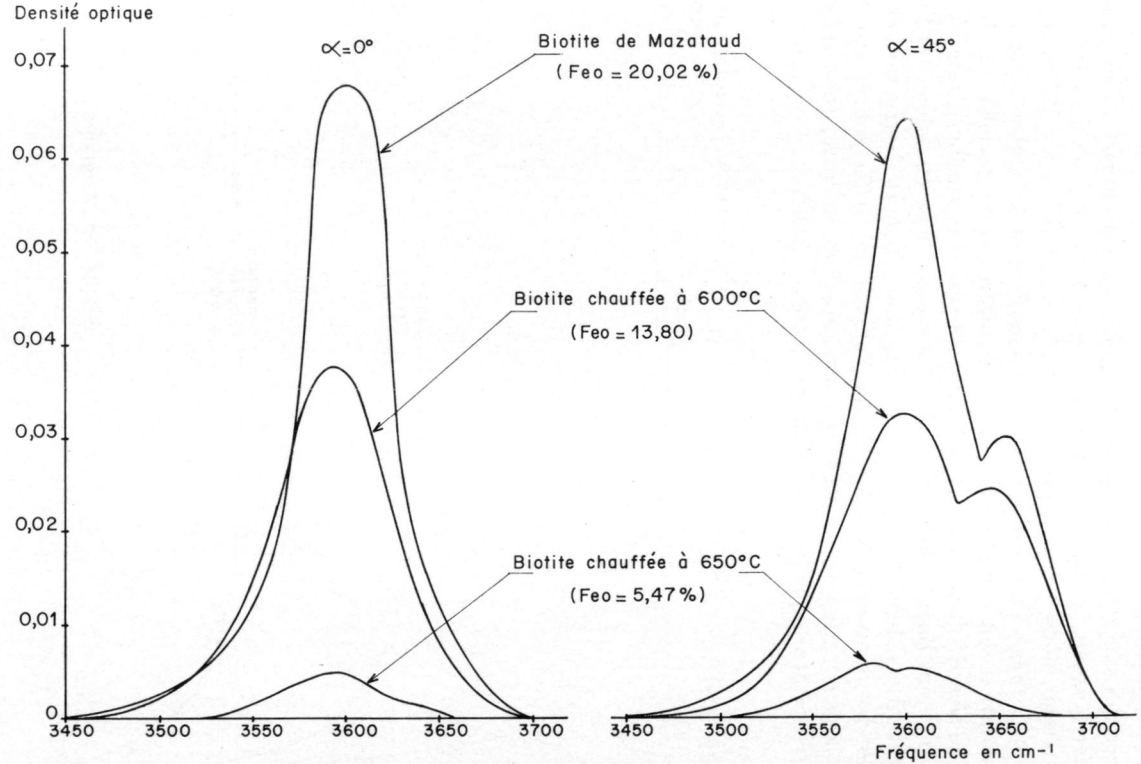



FIG. 11. — *Modification du spectre d'absorption infrarouge de la biotite de Mazataud dans la zone 3 000-3 800 cm⁻¹, en fonction de l'élévation de température*

Dans le cas de la biotite de Varennes, l'oxydation du fer ferreux obtenue est *totale* à 800°C de telle sorte que nous avons réellement la transformation : biotite → oxybiotite, celle-ci ayant la formule indiquée dans le tableau 12 (ligne *d*). Notons qu'il reste encore, à ce stade, les 0,89 OH qui n'ont pas été affectés au cours de l'oxydation du fer et qui partiront à la température habituelle de déshydroxylation des biotites soit entre 1 100 et 1 300°C.

En ce qui concerne la biotite de Mazataud, qui est en partie fluorée, le fait que tout le fer bivalent ne soit pas oxydé entre 800 et 1 000°C, alors qu'il reste des OH dans le réseau, nous amène à penser qu'il n'y aurait pas assez d'hydroxyles disponibles *au voisinage* d'un certain nombre d'ions $Fe^{2+}$ de la couche octaédrique, pour que l'oxydation soit complète à cette température ; il est possible que le fluor soit localisé au sein de domaines bien délimités du réseau cristallin (cation $Fe^{2+}$ au voisinage de 2 ions fluor). On aboutit alors nécessairement ici à une oxyfluor-biotite *partielle* (tabl. 12, ligne *b*) et ce n'est qu'au moment de la destruction de la structure, c'est-à-dire au-delà de 1 100°C, que l'oxydation du fer pourra être totale par suite de la pénétration de l'oxygène de l'air. Signalons en outre, que c'est également à cette température que le fluor s'échappe du résidu solide.

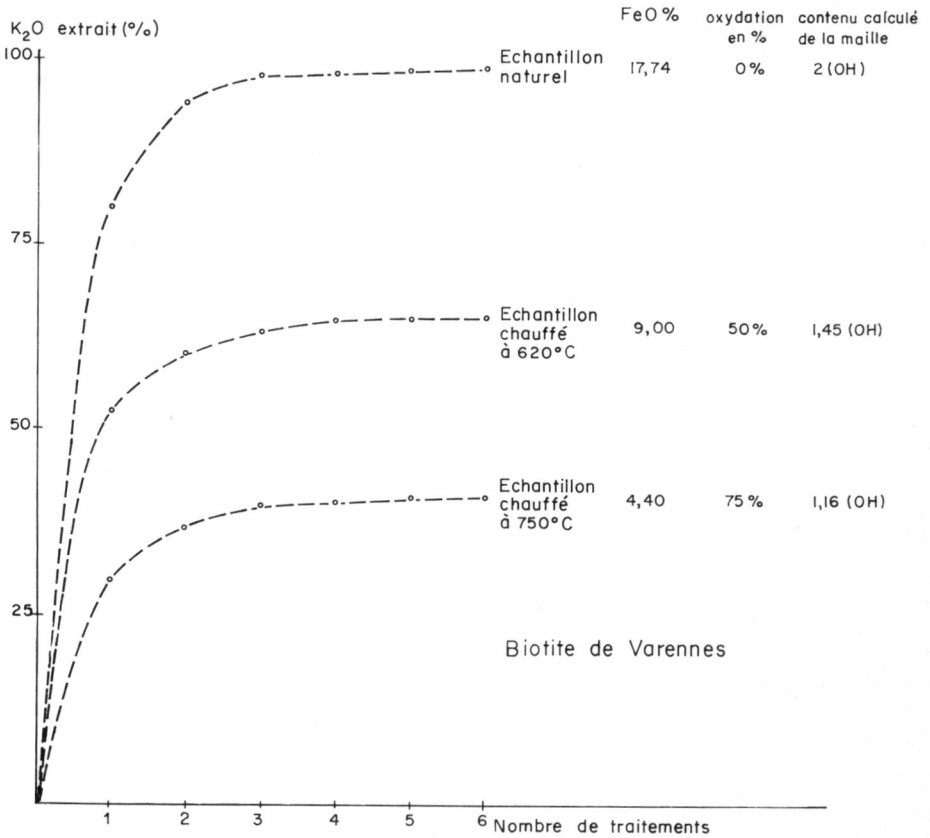



FIG. 12. — *Test d'extraction du $K_2O$* (cobaltinitrite de Na) *appliqué à la biotite de Varennes et aux produits chauffés*

Ainsi, ces expériences de chauffage (ROBERT et PEDRO, 1968) nous montrent qu'en application de la règle de PAULING, précisant que la compensation des charges doit s'effectuer dans le plus petit volume compatible avec la structure, l'oxydation du fer ferreux des micas se produit exclusivement par voie *interne* et se traduit par un départ plus ou moins important d'hydrogène, sans modification fondamentale de la structure phylliteuse. De ce fait, en choisissant convenablement les échantillons d'une part, et les conditions expérimentales d'autre part, il a été possible de préparer artificiellement des micas à des taux d'oxydation variés et d'étudier leur comportement vis-à-vis des tests classiques d'ouverture.

b) *Aptitude des micas oxydés à l'ouverture.*

A cet effet, nous avons utilisé le test au cobaltinitrite ; les résultats obtenus ont été reportés essentiellement sous forme graphique (fig. 12 et 13).

De l'examen de ces courbes, il ressort immédiatement que dans les échantillons fortement oxydés, le potassium est extrait moins facilement que dans les micas normaux (fig. 12). Ce comportement est en relation directe avec l'oxydation : ainsi les produits partiellement oxydés et contenant de ce fait un taux encore notable d'ions hydroxyle font apparaître une réaction intermédiaire.

La biotite de Mazataud qui contient une certaine quantité de fluor montre, après qu'elle ait subi un chauffage, une réaction quasi nulle et tout à fait comparable à celle qu'on obtiendrait avec une muscovite (fig. 13).

Ainsi, contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer au départ en se référant à l'hypothèse de GRÜNER, l'oxydation, lorsqu'elle est compensée au niveau des hydroxyles, ne se traduit pas par une extraction plus aisée du potassium ; on constate même l'effet inverse (ROBERT et PEDRO, 1968).

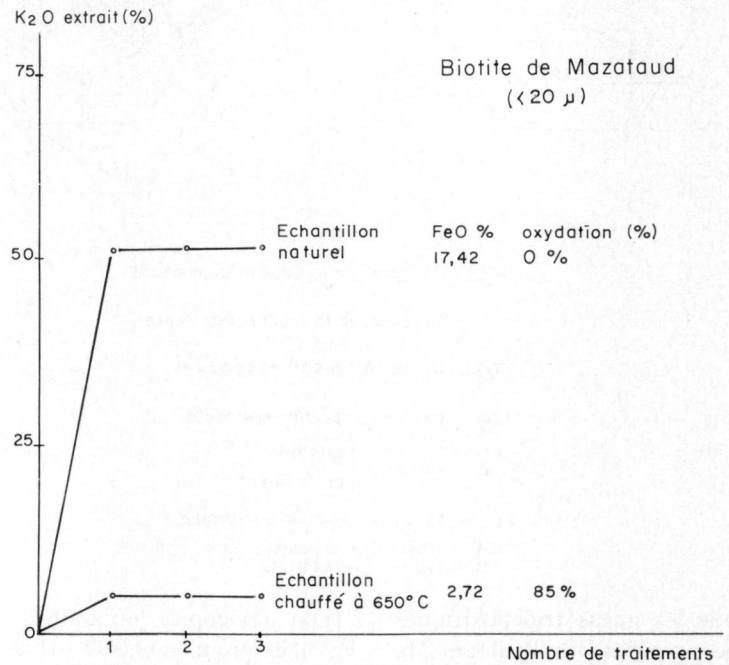



FIG. 13. — *Test d'extraction du $K_2O$ appliqué à la biotite de Mazataud et à l'oxybiotite*

Par contre, l'ensemble des données expérimentales converge pour montrer que l'absence de protons, soit consécutive à leur disparition au cours d'une réaction d'oxydation produite par chauffage, soit du fait que les OH sont naturellement remplacés par du fluor, aboutit à conférer aux édifices micacés une plus grande résistance vis-à-vis de la vermiculitisation.

Ainsi, l'hypothèse de BASSETT (1960), concernant le rôle de répulsion joué directement par les protons des OH sur le potassium situé dans les cavités hexagonales, se trouve nettement confirmée, tout au moins dans un premier temps, si l'on considère le contenu global en protons.

Nous allons étudier ces phénomènes plus en détail :

*2. — Essai d'interprétation à l'aide de la spectroscopie infrarouge*

a) *Contenu hydroxylique des micas et ses relations avec la constitution cristallochimique.*

Les nombreux travaux réalisés par TSUBOI (1950), SERRATOSA et BRADLEY (1958), et enfin BASSETT (1960) montrent qu'il existe deux types d'hydroxyles (fig. 14).

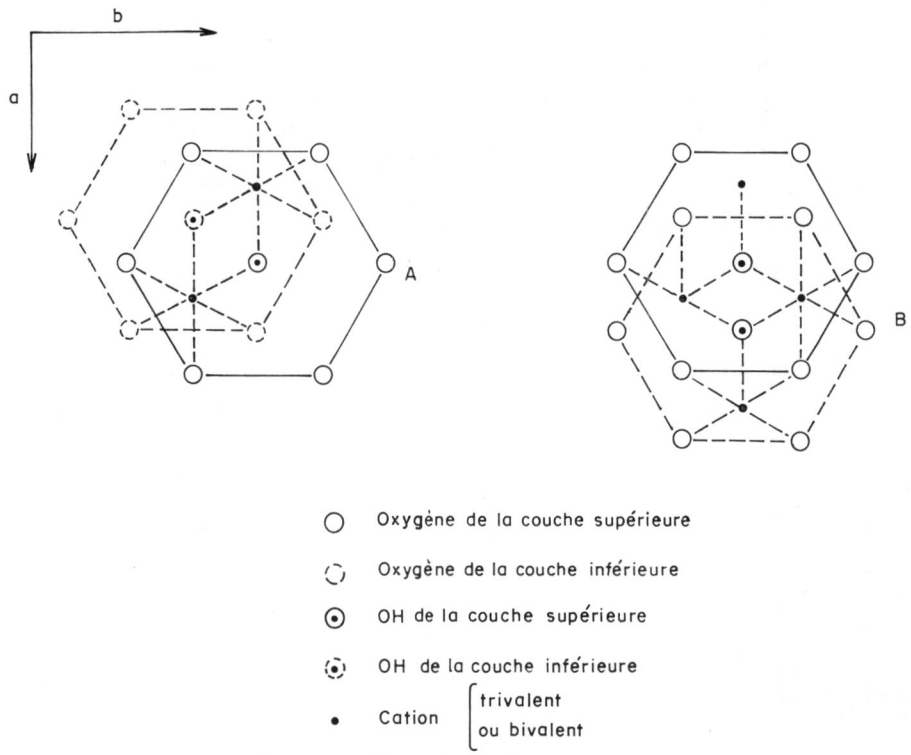



FIG. 14. — *Type d'occupation octaédrique*
A — mica dioctaédrique
B — mica trioctaédrique

— Dans les micas trioctaédriques de type phlogopite, où toutes les cavités sont occupées par des ions divalents ($Mg^{2+}$, $Fe^{2+}$), les groupements O—H sont orientés perpendiculairement au plan des feuillets et donc dirigés sensiblement selon l'axe C

(ils s'en écartent en réalité d'une dizaine de degrés (VEDDER, 1964)). L'examen par spectroscopie infrarouge de ces hydroxyles donne des bandes d'absorption situées entre 3 660 et 3 720 $cm^{-1}$ ; ces bandes sont dichroïques, leur intensité variant lorsqu'on fait tourner le monocristal autour d'un axe perpendiculaire à la direction du faisceau incident.

Ces hydroxyles qui ont leur proton dirigé vers le centre des cavités hexagonales peuvent exercer, selon BASSETT (1960), un effet de répulsion sur les ions potassium situés à l'aplomb de ces cavités.

Lorsque le fluor remplace le groupement O—H, cet effet de répulsion n'existe plus.

— En revanche, dans les micas dioctaédriques comme la muscovite, où l'occupation octaédrique par des cations trivalents n'est que de 2 octaèdres sur 3, les hydroxyles font un angle de $\pm$ 16° avec le plan *ab* (VEDDER et MCDONALD, 1963), et sont probablement dirigés vers la cavité octaédrique inoccupée ; ces hydroxyles donnent des bandes d'absorption infrarouge, qui ne sont pas dichroïques, et qui sont situées à des fréquences plus basses ($<$ à 3 630 $cm^{-1}$). Dans une telle structure, le proton n'aura plus le même effet de répulsion sur le potassium.

Un tel classement des hydroxyles en deux types suivant qu'ils sont « dressés » ou « couchés » sur le plan *ab* est déjà intéressant ; mais si dans une phlogopite on peut rencontrer 100 p. 100 d'hydroxyles « dressés » et dans une muscovite 100 p. 100 d'hydroxyles « couchés », les biotites, qui sont à la base de notre étude, représentent justement le cas intermédiaire.

Il était donc nécessaire de préciser plus en détail les relations pouvant exister entre l'orientation des hydroxyles et la composition cristallochimique.

TABLEAU 13

*Schéma d'attribution des bandes infrarouge des micas trioctaédriques*

(3 500-3 700 $cm^{-1}$)

| Bandes | Types d'hydroxyles | Occupations supposées | Notation | Fréquence de vibration ($cm^{-1}$) | Type structural |
|---|---|---|---|---|---|
| Bande N (normale) | OH dont les sites octaédriques les plus proches sont occupés par des cations divalents | Mg Mg Mg | NA | 3 712 | Phlogopite ↑ |
| | | Mg Mg $Fe^{2+}$ | NB | 3 696 | |
| | | Mg $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ | NC | 3 680 | |
| | | $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ | ND | 3 664 | |
| Bande I (impuretés) | OH dont un des sites octaédriques les plus proches est un cation trivalent $Fe^{3+}$ ou $Al^{3+}$ | Mg Mg $R^{3+}$ | IA | 3 668 | Biotites |
| | | Mg $Fe^{2+}$ $R^{3+}$ | IB | 3 652 | |
| | | $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ $R^{3+}$ | IC | 3 636 | |
| Bande V (vacances) | OH situés près d'un site octaédrique inoccupé | $R^{2+}$ $R^{2+}$ V | VA | ~ 3 625 | ↓ Structures dioctaédriques |
| | | $R^{2+}$ $R^{3+}$ V | VB | ~ 3 600 | |
| | | $R^{3+}$ $R^{3+}$ V | VC | ~ 3 560 | |

Remarquons tout d'abord que, si le taux de substitution tétraédrique peut intervenir (plus d'ailleurs, semble-t-il, sur la largeur des bandes que sur leur position) ainsi que le champ exercé par le potassium (nous aurons d'ailleurs à en tenir compte lors de l'ouverture des micas), l'influence essentielle est liée à la composition de la couche octaédrique.

A l'heure actuelle, plusieurs auteurs (VEDDER, 1964 ; FARMER *et al.*, 1967 ; WILKINS, 1967) ont tendance à décomposer le spectre infrarouge en bandes attribuées à un environnement octaédrique précis (tabl. 13).

Ainsi, dans une structure trioctaédrique, le remplacement isomorphique de Mg par $Fe^{2+}$ ou de $Fe^{2+}$ par $Fe^{3+}$, provoque un abaissement de la fréquence de vibration des hydroxyles (1 $Fe^{2+}$ provoque un abaissement de 16 $cm^{-1}$). Il en sera de même lors de la création de sites libres.

Cette diminution de la fréquence Y de vibration se traduit par une diminution de la force de liaison O—H de l'hydroxyle correspondant ; c'est ce que montre la formule classique :

$$Y = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{\mu}} \text{ où Y est liée à la constante de rappel K.}$$

($\mu$ = masse réduite du système oscillant).

b) *Interprétation du comportement des biotites et des oxybiotites.*

*Micas sains.*

Le comportement de la muscovite (majorité d'OH couchés) et de la phlogopite (majorité d'OH dressés) est en accord avec l'hypothèse de BASSETT. Celui des 2 biotites ne peut être interprété sur cette base qu'à partir de données plus précises. Nous avons donc enregistré les spectres infrarouge de ces 2 micas dans la zone 2 800 $cm^{-1}$, 3 800 $cm^{-1}$ (fig. 15 et 16 : Mazataud sur un monocristal en plaquette ; Varennes sur de petits cristaux (1)).

On distingue ainsi 4 bandes nettement résolues pour la biotite de Varennes et 2 pour la biotite de Mazataud.

Connaissant la formule structurale de ces minéraux, on peut alors les interpréter en se référant au schéma de VEDDER (indiqué dans le tableau 13) : c'est ce que nous avons fait dans le tableau 14.

En complément à ces données qualitatives, des mesures quantitatives ont été effectuées sur ces 2 micas, et on peut préciser ici la proportion relative entre les OH dressés et couchés (détermination ROUXHET). Les résultats sont reportés dans le tableau 15.

Ces données montrent que la différence de comportement observée quant à l'aptitude des 2 biotites saines à libérer le potassium peut être rattachée à la teneur en hydroxyles dressés.

*Micas oxydés par voie thermique.*

Si le comportement des micas sains se justifie dans l'ensemble à partir de l'hypothèse de BASSETT, il est plus difficile d'interpréter les modifications obtenues lors du chauffage de ces biotites, et en particulier la diminution de l'aptitude à leur ouverture.

(1) Petits cristaux orientés légèrement pressés avec du KBr, entre deux cubes d'acier.

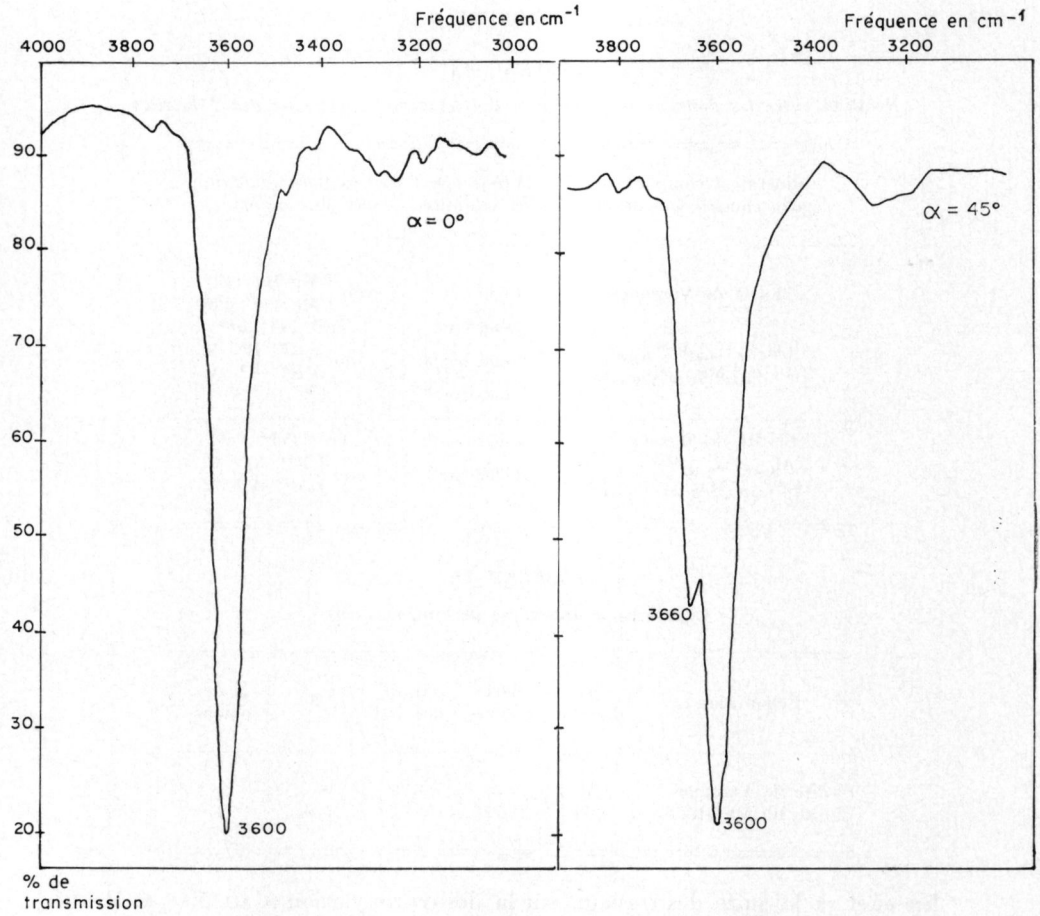



FIG. 15. — *Spectre infrarouge de la biotite de Mazataud*

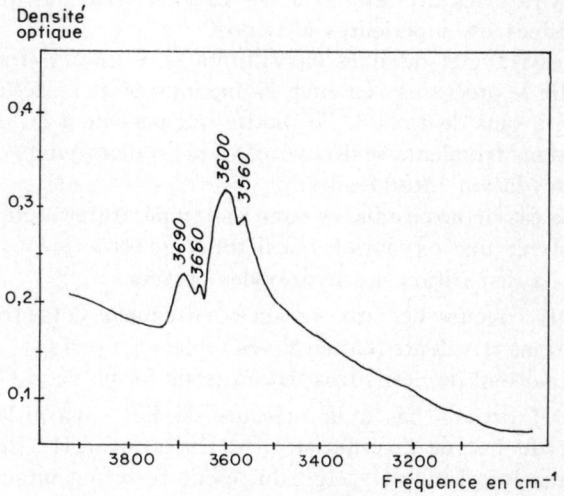



FIG. 16. — *Spectre infrarouge de la biotite de Varennes*

TABLEAU 14

*Relation entre les données infrarouge et l'occupation octaédrique des 2 biotites*

| Minéral et composition de la couche octaédrique | Fréquences de vibration | Occupation octaédrique la plus probable |
|---|---|---|
| Biotite de Varennes | 3 690 $cm^{-1}$ | ou { Mg Mg $Fe^{2+}$ / Mg $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ |
| | 3 660 $cm^{-1}$ | $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ |
| $[(Al_{0,10}Ti_{0,22}Fe^{3+}_{0,06})]$ $[(Fe^{2+}_{1,12}Mg_{1,30}Mn_{0,02})]$ | 3 600 $cm^{-1}$ | ou { $R^{2+}$ $R^{2+}$ V / $R^{2+}$ $R^{3+}$ V |
| | 3 560 $cm^{-1}$ | $R^{3+}$ $R^{3+}$ V |
| Biotite de Mazataud $[(Al_{0,681}Ti_{0,143}Fe^{3+}_{0,04})]$ $[(Fe^{2+}_{1,287}Mg_{0,377}Mn_{0,04})]$ | 3 660 $cm^{-1}$ | $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ $Fe^{2+}$ |
| | 3 600 $cm^{-1}$ | ou { $R^{2+}$ $Al^{3+}$ V / $Al^{3+}$ $Al^{3+}$ V |

TABLEAU 15

*Constitution anionique des micas sains*

| Échantillon | OH dressés | OH couchés | Total des OH | F | Σ des anions |
|---|---|---|---|---|---|
| Biotite de Varennes .. | 1,45 | 0,54 | 1,99 | 0 | 2 |
| Biotite de Mazataud.. | 0,89 | 0,72 | 1,61 | 0,40 | 2 |

En effet, à la suite des travaux sur la déshydroxylation (CAILLÈRE et HÉNIN 1958 ; EBERHART, 1963 ; ROUXHET, 1968), on serait normalement amené à penser que ce sont les hydroxyles couchés liés à $Al^{3+}$ ou à $Fe^{3+}$ qui partent les premiers et non pas les hydroxyles dressés liés à des cations divalents qui nécessitent des températures voisines ou supérieures à 1 000°C.

En réalité, les travaux détaillés de VEDDER et WILKINS (1969) peuvent nous aider à comprendre le processus : en effet, si une muscovite se déshydroxyle à 600°C et une phlogopite à plus de 1 000°C, la biotite qui possède à la fois des cations bivalents et des cations trivalents se déshydroxylera en deux temps ; de plus au cours du chauffage, l'oxydation interviendra.

Ainsi, dans le cas de nos essais, et pour les températures auxquelles nous avons chauffé afin d'obtenir une oxydation quasi totale (c'est-à-dire 650°C à 700°C), on peut prévoir que la disparition des hydroxyles portera :

— sur les OH couchés liés aux vacances en couche octaédrique résultant de la présence de cations trivalents (bande V des tableaux 13 et 14) ; ces OH s'en iront par un processus normal de déshydroxylation (sous forme de $H_2O$) ;

— sur les OH dressés liés à la présence de $Fe^{2+}$ (parmi les bandes N et I) qui se détruiront du fait de l'oxydation avec libération d'$H^+$ (fig. 11). Toutefois, les hydroxyles dressés voisins de 3 $Mg^{2+}$ du réseau resteront intacts jusqu'aux environs de 1 000°C.

Ainsi, en s'appuyant sur cet ensemble de données, le comportement des oxybiotites de Varennes et de Mazataud peut également s'interpréter à l'aide de l'hypothèse de BASSETT :

— pour l'oxybiotite de Varennes (obtenue après chauffage à 750°C), la libération de potassium qui est encore voisine de 40 p. 100 s'explique sans doute par la persistance des OH dressés liés en majorité aux cations magnésium (bande à 3 690) : il y a en effet au départ 1,29 $Mg^{2+}$ pour 1,11 $Fe^{2+}$ en couche octaédrique (fig. 12) ;

— dans le cas de la biotite de Mazataud, la quantité de $Mg^{2+}$ présente dans le réseau (0,38 atome par maille) est faible, d'où la teneur peu élevée en OH dressés, persistant dans le spectre infrarouge à 650°C (fig. 11) et par voie de conséquence, la faible réaction de l'oxybiotite vis-à-vis du test d'extraction (1) (fig. 13).

Un autre effet signalé par VEDDER (1969) peut être également constaté sur la figure 11 : il concerne le glissement des vibrations vers les basses fréquences par suite de l'oxydation du fer ferreux. Ce glissement que nous retrouverons dans d'autres circonstances s'explique d'après VEDDER par les transformations suivantes :

Bande $N_B$ (2 Mg $Fe^{2+}$) ⟶ Bande $I_A$ (2 Mg $Fe^{3+}$)

$N_C$ (Mg 2 $Fe^{2+}$) ⟶ $I_B$ (Mg $Fe^{2+}$ $Fe^{3+}$) → Mg 2 $Fe^{3+}$

$N_D$ (3 $Fe^{2+}$) → $I_C$ ($Fe^{2+}Fe^{2+}Fe^{3+}$) ⟶ 3 $Fe^{3+}$ (instable)

Or, d'après le tableau 13, cela entraîne des abaissements de fréquence voisins de 40 $cm^{-1}$.

Nous en retiendrons un élément essentiel pour la compréhension de l'oxydation : le remplacement de $Fe^{2+}$ par $Fe^{3+}$ provoque un affaiblissement de la force de liaison O—H correspondante et donc un facteur favorable à une déshydroxylation.

Ces données montrent en définitive que le comportement des micas vis-à-vis du potassium apparaît devoir être relié aux hydroxyles comme le pensait BASSETT (1960) et cette constitution hydroxylique est le *reflet de la composition* octaédrique détaillée des micas. Ainsi, toute modification de cette composition octaédrique (sous l'effet de l'oxydation par exemple) se répercutera sur les hydroxyles et par voie de conséquence sur le comportement du potassium et l'aptitude à l'ouverture des micas.

## B. — ÉTUDE DES RELATIONS ENTRE L'OUVERTURE DES MICAS ET L'OXYDATION OBTENUE PAR VOIE CHIMIQUE

L'oxydation quand elle résulte d'un traitement thermique peut paraître artificielle ; de plus, elle ne joue finalement qu'un rôle très indirect dans les phénomènes d'ouverture des micas. Aussi avons-nous été conduits, pour la suite de nos recherches, à provoquer l'oxydation des échantillons à la température ordinaire en utilisant des agents oxydants.

### 1. — *Essais d'oxydation par voie chimique — Possibilités et limites*

a) *Oxydation directe des biotites.*

Le potentiel normal d'oxydo-réduction du couple $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ n'est pas très élevé (0,77 volts). Toutefois, étant donné que la plupart des oxydants usuels agissent en milieu très acide, le traitement risque toujours plus ou moins de mettre en solution une fraction des ions constituant la couche octaédrique.

(1) Il faudrait tenir compte du fluor, mais celui-ci est présent aussi bien dans la biotite que dans l'oxybiotite.

Nous avons donc choisi comme réactif, un oxydant énergique, l'eau *oxygénée* (potentiel redox = 1,77 volts) dont la forme électrolytique se montre faiblement agressive (pH ~ 4).

Une certaine quantité de micas (4 g) a été mise au contact de 100 cm³ d'eau oxygénée dans des conditions variées ($H_2O_2$ 110 volumes à froid ou avec agitation et chauffage à 40°C, ou $H_2O_2$ 10 volumes). Ces traitements provoquent une *pulvérisation* importante des micas, mais l'oxydation n'atteint au maximum que 7 p. 100 des ions $Fe^{2+}$ du minéral de départ et la libération de $K_2O$ n'est que de 1 à 2 p. 100. Ces essais font ainsi nettement ressortir *la très grande stabilité des micas vis-à-vis des conditions oxydantes réalisées lors d'un traitement chimique*. Tout se passe en effet comme si l'oxydant ne pouvait pas atteindre les ions $Fe^{2+}$ dans les cavités octaédriques.

Nous avons alors procédé différemment et tenté d'agir sur des *micas ouverts*.

b) *Oxydation de biotites après ouverture artificielle.*

A cet effet, nous avons réalisé la série d'essais suivants :

— dans une première phase, nous avons traité une certaine quantité de biotite de Varennes par une solution de NaCl N à 80°C, de façon à provoquer un échange et obtenir différents taux d'extraction de potassium (15 p. 100, 30 p. 100, 60 p. 100, 80 p. 100 et 100 p. 100), correspondant à des degrés d'ouverture plus ou moins marqués (série *a*) ;

— puis, au cours d'une seconde phase, les produits ainsi préparés et dont la teneur en fer ferreux avait été déterminée, ont été mis au contact d'une solution d'eau oxygénée à 110 volumes pendant 24 heures à 40°C, après quoi ils ont été de nouveau analysés (série *b*).

Les résultats obtenus (fig. 17) font ressortir les deux points suivants :

— l'extraction du potassium interfoliaire va toujours de pair avec une certaine oxydation du fer ferreux (oxydation primaire) ; celle-ci augmente au fur et à mesure de l'ouverture jusqu'à atteindre 56 p. 100 environ lorsque les ions K sont totalement éliminés. Nous avions constaté ce fait lors des études antérieures sur la vermiculitisation ;

— l'eau oxygénée agissant ensuite sur des biotites partiellement ouvertes et oxydées permet d'obtenir un *complément* d'oxydation (oxydation secondaire), qui est toutefois fonction du taux d'extraction en ions K. C'est ainsi que cette oxydation secondaire est d'autant plus importante que l'échantillon de départ est plus ouvert ; en pratique, elle n'arrive d'ailleurs à être totale que lorsque le potassium est entièrement extrait. La figure 17 illustre parfaitement ces relations entre ouverture (extraction de $K_2O$) et oxydation.

On est alors amené à conclure que la grande stabilité de la biotite vis-à-vis des réactions d'oxydation est due essentiellement à *la présence d'ions K* en positions interfoliaires. On retrouve ainsi le rôle de « barrière » qui a été mis en évidence pour certains ions compensateurs (K, $NH_4$...), dans les phénomènes d'oxydo-réduction affectant les vermiculites (Wey et Le Dred, 1967).

Mais, il ne s'agit pas là d'une caractéristique chimique de l'ion potassium. D'après les expériences précédentes, en effet, ce dernier ne joue ce rôle de barrière que dans la mesure où il constitue un tenon qui maintient les feuillets en contact

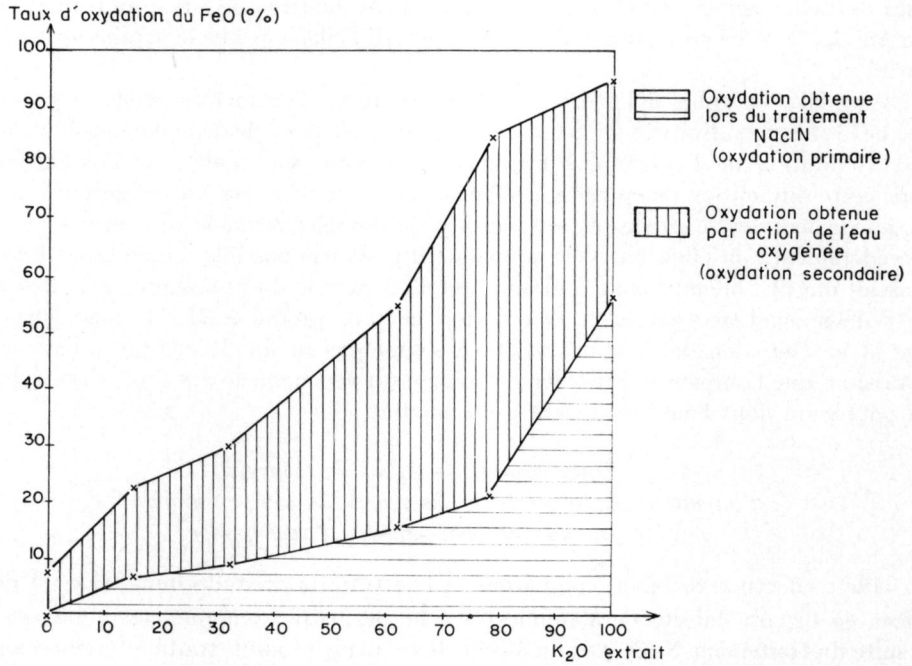



FIG. 17. — *Taux d'oxydation du FeO en fonction de l'ouverture des feuillets* (biotite de Varennes)

et empêche la pénétration des réactifs oxydants. Par contre, dès que le potassium est remplacé par des cations plus hydratables, tels que Na, Mg, Ca, l'eau (potentiel redox ~ 1,23 volts) et l'eau oxygénée (potentiel redox ~ 1,77 volts) peuvent pénétrer dans les espaces interfoliaires et provoquer une certaine oxydation du $Fe^{II}$ situé dans les couches octaédriques (1). Ces résultats sont importants car la distinction entre oxydation et vermiculitisation n'avait jamais pu être effectuée aussi nettement (BARSHAD et KISHK, 1968 ; JUO et WHITE, 1969).

A la lumière de ces divers essais, il semble donc bien établi que l'oxydation par voie chimique n'arrive à affecter les micas *qu'au cours* de l'évolution ou encore *après* leur ouverture (même partielle), *mais jamais avant*. Dans de telles conditions, on peut alors se demander si ce phénomène participe même d'une manière ou d'une autre à l'ouverture des phyllites. C'est ce que nous allons envisager ci-dessous.

c) *Influence de l'oxydation sur les phénomènes d'ouverture.*

En soumettant les échantillons partiellement ouverts et oxydés à divers degrés, à un test au cobaltinitrite, on ne peut pas mettre en évidence de différences significatives dans l'aptitude à libérer le potassium.

Des expériences récentes dues à BARSHAD et KISHK (1968) ont envisagé le problème sous un autre aspect. C'est ainsi qu'ayant refixé du potassium sur le

(1) Nous avions déjà constaté lors du traitement thermique que l'oxydation du fer était obtenue vers 600°C, non par action de l'oxygène de l'air, mais par départ de protons. L'oxygène ne peut en effet pénétrer dans l'édifice que lors de la destruction du réseau vers 1 100°C.

mica partiellement ouvert et oxydé, les auteurs ont montré que lors d'un traitement par $MgCl_2$ 0,2 N, ce potassium refixé sortait plus difficilement que le potassium initial du mica.

De ce fait, et grâce à l'utilisation d'une solution d'extraction moins agressive que ne l'est le cobaltinitrite, on peut penser qu'il serait possible de mettre en évidence une diminution de l'aptitude à libérer le potassium sous l'effet de l'oxydation. Mais cette diminution des possibilités d'échange porte alors sur du potassium refixé et, au demeurant, le processus semble bien se dérouler selon le mécanisme décrit précédemment ; en effet, par voie chimique, il n'est pas possible d'oxyder les micas sans les ouvrir ; or, au fur et à mesure que l'on extrait du potassium, des sites de $Fe^{2+}$ deviennent accessibles et l'oxydation peut se produire. Il est donc normal que la modification de comportement ne s'applique en fin de compte qu'au seul potassium que l'on peut éventuellement refixer au voisinage de ces sites, c'est-à-dire au potassium dont l'environnement a été modifié.

### 2. — *Établissement du bilan des charges et premières hypothèses sur les modes de compensation mis en jeu lors des phénomènes d'oxydation*

Pour effectuer ce bilan, comparons la constitution cristallochimique d'un des micas de départ (biotite de Varennes) à celle de l'édifice complètement ouvert à la suite du traitement NaCl et enfin à celle de ce même produit, traité ultérieurement par de l'eau oxygénée.

A partir des formules structurales présentées dans le tableau 12 (lignes *c*, *e* et *f*), nous avons établi le bilan des charges figurant dans le tableau 16.

Nous avons déjà discuté l'exemple de la biotite traitée par NaCl (vermiculite Na avec 55 p. 100 du $Fe^{2+}$ oxydé) : la charge interfoliaire obtenue est alors de 0,70 (abaissement de 0,22 par rapport au mica non traité). Si on soumet cette vermiculite Na au test d'oxydation, l'abaissement de charge s'accentue et le minéral est caractérisé par une charge voisine de 0,50. Nous avons ici un nouvel exemple particulièrement démonstratif du fait que, dans la vermiculite oxydée, *nous ne retrouvons pas l'effet intégral de l'oxydation*. Celle-ci entraînerait d'ailleurs une augmentation de charge positive de plus d'une unité par maille, et si cette action se compensait uniquement en couche interfoliaire on aboutirait à un minéral à feuillet neutre (type talc), ce qui n'est pas le cas.

Si nous effectuons des dosages dans les solutions d'$H_2O_2$ lors des tests effectués à différents degrés d'ouverture, nous trouvons une expulsion de cations.

Ce ne sont pas des ions K des édifices micacés originaux comme le pensait GRÜNER, mais les ions Na échangeables d'édifices ouverts. Comme cette expulsion ne porte que sur 0,20 Na, il faut chercher ailleurs une compensation complète des charges.

Il faut alors imaginer que la compensation porte sur tous les facteurs susceptibles de modifier la charge : état d'oxydation des ions, perte de protons, expulsion de cations échangeables et la formule la plus générale d'un mica en voie d'évolution s'écrirait donc :

$$(Si_{4-x}Al_x)\ (M^{II}{}_{3-y}M^{III}{}_y)\ O_{10+z}(OH)_{2-z}M^{I}{}_{x-(y-z)}$$

TABLEAU 16

*Constitution cristallochimique et bilan des charges dans un certain nombre d'échantillons*

| Échantillons étudiés | | Biotite de Varennes (départ) | Biotite ouverte NaCl (série *a*) | Biotite ouverte $NaCl + H_2O_2$ (série *b*) | Biotite oxydée de l'arène | Biotite oxydée thermiquement |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre d'ions | En positions tétraédriques | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | En positions octaédriques | 2,83 | 2,72 | 2,72 | 2,64 | 2,83 |
| | En positions interfoliaires | 0,90 | 0,68 | 0,47 | 0,77 | 0,90 |
| Déficit de charge tétraédrique | | — 1,20 | — 1,25 | — 1,25 | — 1,17 | — 1,20 |
| Excès de charge octaédrique | | + 0,26 | + 0,54 | + 0,96 | + 0,38 | + 1,37 |
| Charge théorique du feuillet | | + 0,94 | + 0,54 | — 0,29 (1) | + 0,79 | + 0,17 (2) |
| Charge des espaces interfoliaires | | + 0,93 | + 0,70 | + 0,49 | + 0,78 | + 0,93 |
| Abaissement de la charge interfoliaire par rapport à la biotite saine | | 0 | 0,23 | 0,44 | 0,15 | 0 |
| Abaissement de charge correspondant théoriquement à l'oxydation observée | | 0 | 0,61 | 1,04 | 0,40 | 1,11 |

(1) Compensé sans doute par un départ de protons
(2) Compensé par départ de 1,10 H des OH.

### 3. — *Étude des différents modes de compensation des charges au niveau de la couche anionique par des études en spectroscopie infrarouge*

L'établissement de bilans effectués sur la base des résultats de l'analyse chimique nous apporte une interprétation satisfaisante du comportement des micas. Cependant nous sommes amenés à envisager une compensation au niveau de la couche anionique, et il nous a paru préférable de confirmer une partie de nos conclusions en utilisant les données de la spectroscopie infrarouge.

a) *Conditions expérimentales.*

Il était difficile d'appliquer d'une manière précise la technique à nos matériaux :

— les particules étant de petite taille, il n'était pas aisé de les orienter pour mettre en évidence les effets de dichroïsme. Toutefois, la forme lamellaire de ces produits les amène à se déposer parallèlement au plan *ab*, et il se constitue ainsi des pellicules suffisamment orientées pour que la technique puisse être appliquée ;

— la seconde difficulté est plus fondamentale : dans le spectre infrarouge des minéraux hydratés, la bande due à l'eau adsorbée empiète sur celle des hydroxyles de constitution. Deux techniques ont été utilisées pour lever cette difficulté (PROST, 1970).

1. Lors de la préparation de pastille de KBr, on a procédé à un chauffage à 250°C pendant 48 heures pour éliminer l'eau d'hydratation ; les pastilles étant à nouveau pressées à 5 000 kg/cm² avant d'être examinées.

2. Une deuxième méthode a consisté à effectuer des spectres après deutération sélective des OH de l'eau adsorbée, ce qui provoque le déplacement de la bande de l'eau de 3 400 $cm^{-1}$ à 2 500 $cm^{-1}$.

b) *Résultats.*

Nous allons étudier successivement les spectres des 2 biotites et d'une phlogopite et observer les modifications qui interviennent lors de l'ouverture ou de l'oxydation. Nous citerons enfin en référence le spectre d'une vermiculite naturelle.

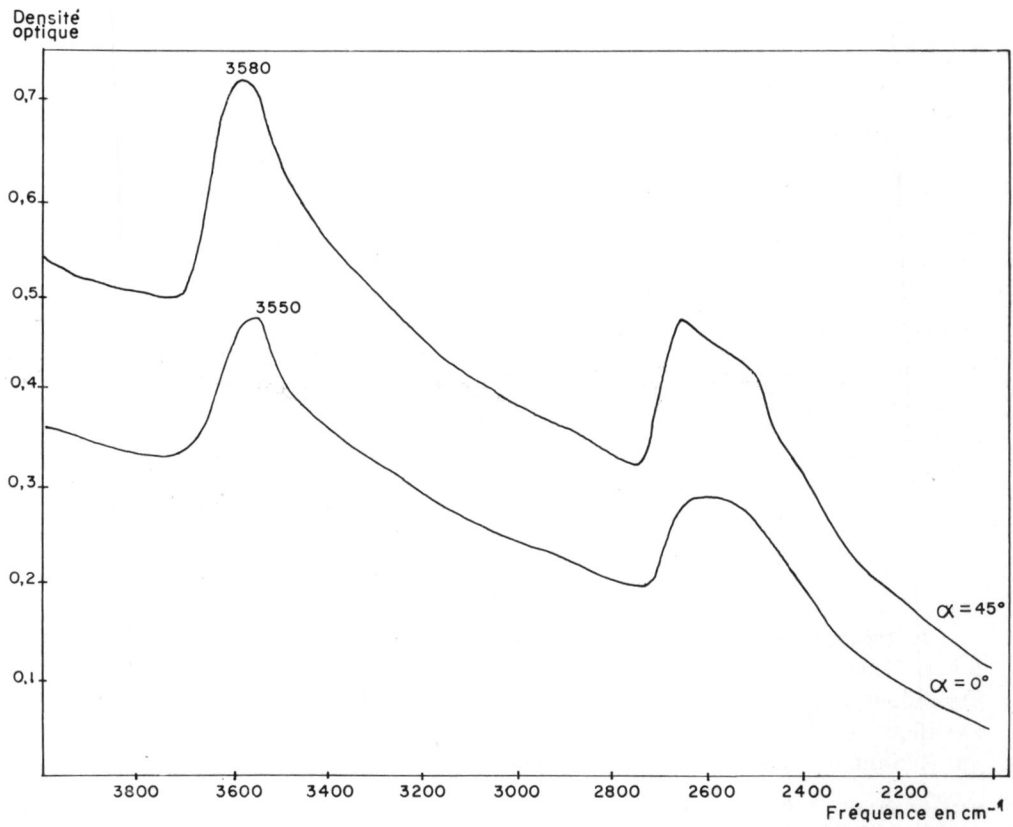



FIG. 18. — *Spectre infrarouge de la biotite de Varennes ouverte et oxydée* (deutérée)

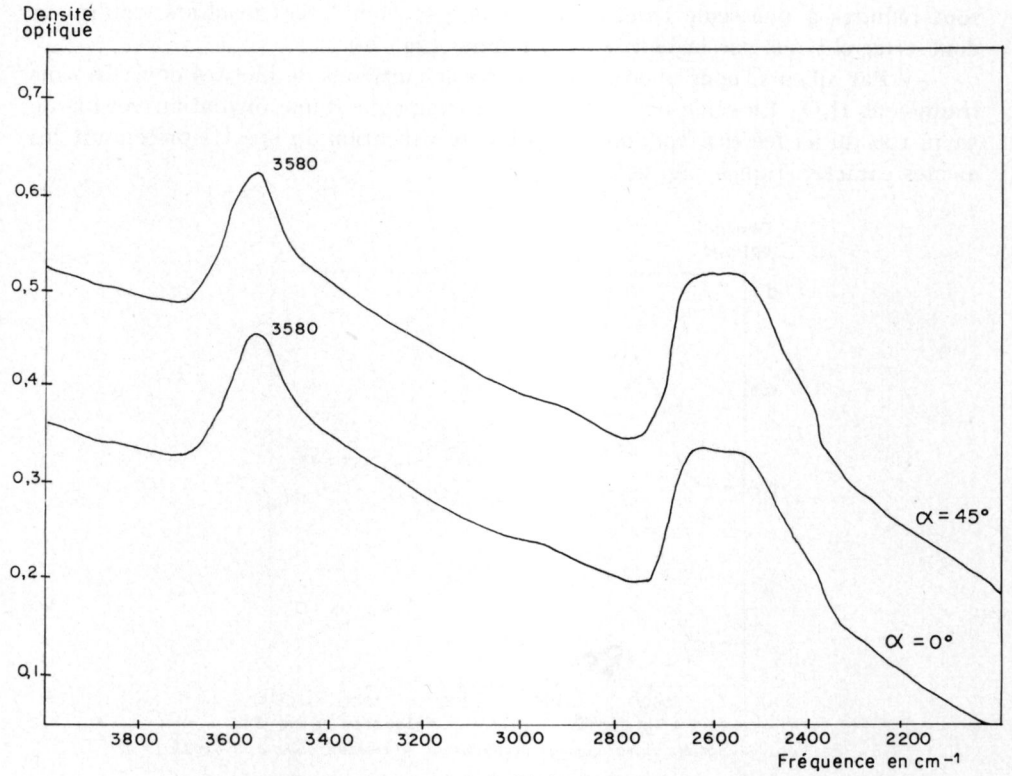



FIG. 19. — *Spectre infrarouge de la biotite de Varennes ouverte et oxydée* (mise sous vide et chauffée)

*Biotite de Varennes.*

Sur tous les enregistrements effectués (fig. 18), on constate la présence d'une seule bande vibrant à basse fréquence (aux environs de 3 550 $cm^{-1}$ à 3 560 $cm^{-1}$).

Dans certaines conditions, et pour un angle de rotation du cristal de $\alpha = 45°$, cette bande peut se déplacer vers 3 580 $cm^{-1}$ et indique un léger dichroïsme. Par la suite, grâce à des études plus fines des spectres, il a été possible d'attribuer ce dichroïsme à une bande de l'eau résiduelle. On dispose pour cela de deux éléments :

— d'une part, on constate ce dichroïsme dans une zone de vibration propre à l'eau lourde (2 000-2 800 $cm^{-1}$) ;

— d'autre part, on ne retrouverait pas ce déplacement de fréquence 3 560 → 3 580 $cm^{-1}$ pour des échantillons placés sous vide ou chauffés (fig. 19).

Toutes les données convergent donc pour montrer que les 4 bandes initialement présentes dans la biotite de Varennes saine (fig. 16), se réduisent dans le mica ouvert et oxydé à une seule bande importante, de basse fréquence (3 580 $cm^{-1}$) et non dichroïque, correspondant donc à la vibration d'hydroxyles couchés.

*Biotite de Mazataud.*

Le minéral a été traité jusqu'à extraction totale du K et soumis à une oxydation : les 2 bandes présentes dans le spectre infrarouge du mica de départ (fig. 15)

sont réduites à une seule bande située vers 3 570 $cm^{-1}$. Ces résultats confirment donc ceux obtenus sur la biotite de Varennes (fig. 20).

— Par ailleurs, nous avons examiné des échantillons de biotites ouvertes sans traitement $H_2O_2$. La seule ouverture qui s'accompagne d'une oxydation voisine de 50 p. 100 du fer ferreux, conduit déjà à une modification du spectre présentant les mêmes caractéristiques (fig. 21).

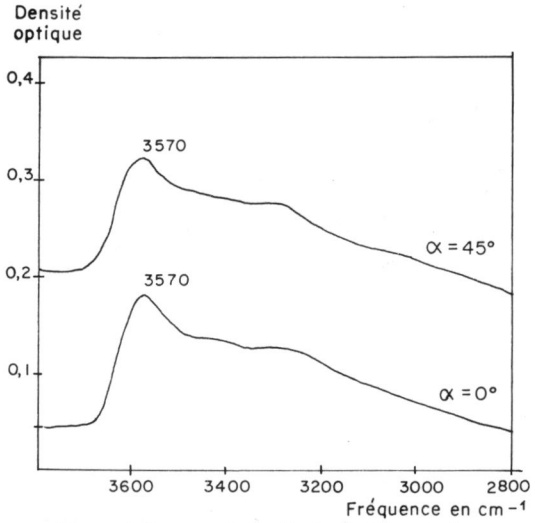



FIG. 20. — *Spectre infrarouge de la biotite de Mazataud ouverte et oxydée*

Soulignons que tant pour Varennes que pour Mazataud, les modifications observées persistent si l'on refixe du potassium sur le minéral.

*Phlogopite de Madagascar.*

Ce minéral, étant pauvre en fer ferreux, permet de confirmer que l'évolution des spectres infrarouges observée sur les biotites, est bien due à l'oxydation : en effet, les spectres des minéraux ouverts sont analogues à ceux de la phlogopite de départ (fig. 22 et 23).

Notons qu'il s'agit de produits déshydratés à 250°C. Quand on examine les produits hydratés, on constate un abaissement de la fréquence de vibration d'environ 40 $cm^{-1}$. Mais cet abaissement est réversible (CHAUSSIDON, 1970) et apparaît lié à la seule modification du champ électrique interfoliaire (FARMER et RUSSELL, 1966) et non pas à une modification plus profonde de la structure.

*Vermiculite du Kenya.*

Afin d'avoir un bon spectre de référence d'une vermiculite naturelle, nous avons utilisé la vermiculite du Kenya dont la composition octaédrique est, d'après la formule structurale (calculée par FOSTER, 1963) : $[(Al_{0,08}\,Fe^{3+}{}_{0,46})\,(Fe^{2+}{}_{0,03}\,Mg^{2+}{}_{2,43})]$.

Avec la même technique que précédemment (chauffage en pastille de KBr), le spectre infrarouge (fig. 24) donne 2 bandes très nettes à 3 660 $cm^{-1}$ et 3 630 $cm^{-1}$ (1)

(1) La fréquence classiquement citée pour une vermiculite est 3 660 $cm^{-1}$. Il faudrait effectuer des expériences de deutération pour être vraiment certain que la bande à 3 630 $cm^{-1}$ appartient bien au spectre de la vermiculite.

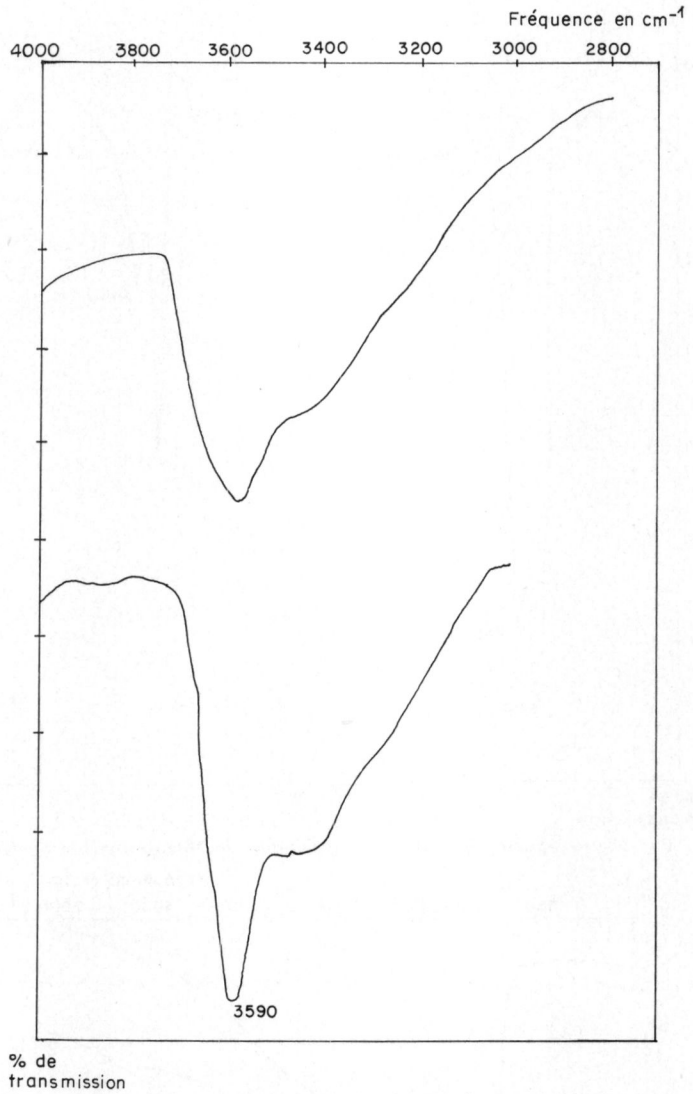



FIG. 21. — *Spectre infrarouge des deux biotites ouvertes sans traitement* $H_2O_2$ (oxydation 50 p. 100)
biotite de Varennes = spectre supérieur
biotite de Mazataud = spectre inférieur

qui correspondraient bien à celles d'une phlogopite ouverte et hydratée. Par contre, cette vermiculite étant pauvre en fer, on ne constate pas la présence de bande à plus basse fréquence.

c) *Essai d'interprétation.*

— L'ouverture d'un mica trioctaédrique s'accompagne d'un simple glissement de fréquence apparemment réversible (si la charge varie peu), dû à un éloignement du cation interfoliaire et sans doute à une variation du champ électrique correspondant.

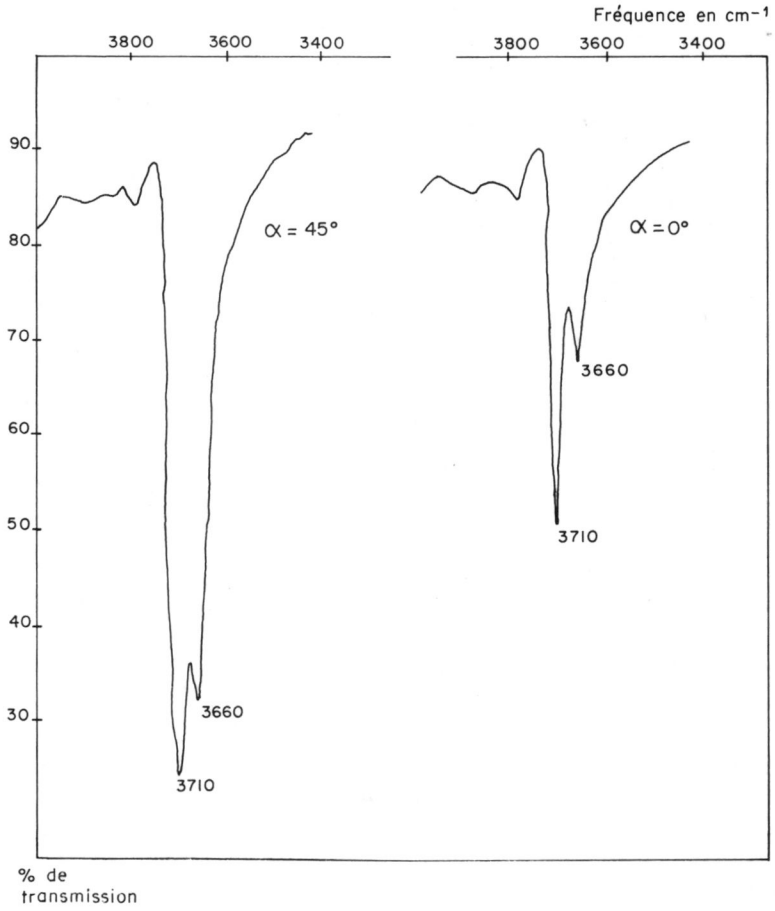



FIG. 22. — *Spectre infrarouge de la phlogopite de Madagascar* (mica sain)

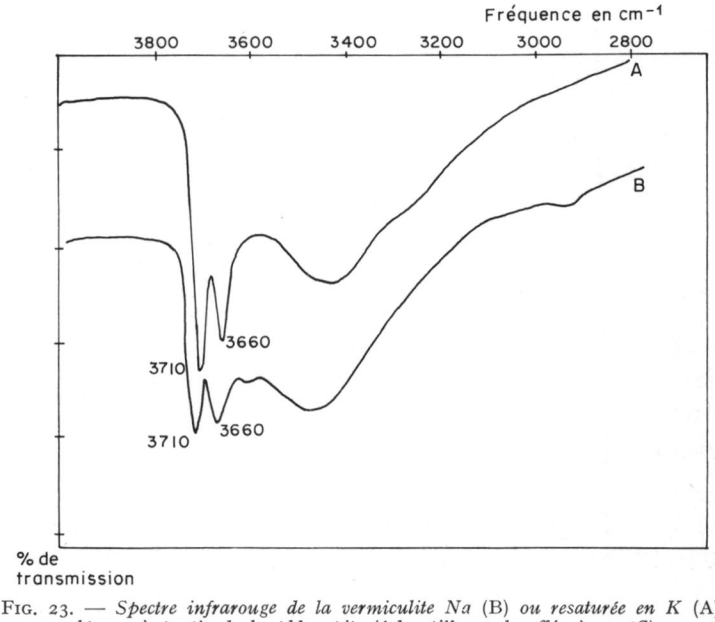



FIG. 23. — *Spectre infrarouge de la vermiculite Na* (B) *ou resaturée en K* (A) *obtenue à partir de la phlogopite* (échantillons chauffés à 250°C)

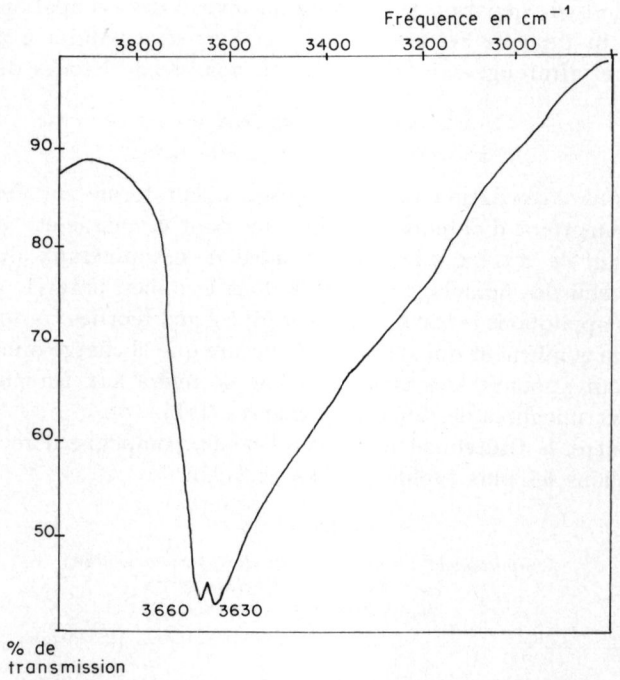



FIG. 24. — *Spectre infrarouge de la vermiculite du Kenya* (rendue K et chauffée à 250°C)

La fréquence de vibration du mica tend ainsi à se rapprocher de celle d'un silicate phylliteux 2/1 non chargé (talc).

— En revanche, si le mica est riche en fer, l'oxydation peut s'exercer au cours de l'ouverture ; elle conduit alors à une transformation beaucoup plus importante du spectre infrarouge : transformation qui n'est pas réversible par simple refixation du K ou par déshydratation et chauffage (comme ce serait, par contre, le cas pour pour une phlogopite ouverte).

Ce fait conduit à admettre une évolution cristallochimique beaucoup plus grande dans ce dernier cas ; évolution que les données des analyses chimiques et de la spectroscopie infrarouge nous permettent de préciser.

Ainsi nous avons constaté que la formule de la couche octaédrique de la biotite de Varennes oxydée peut s'écrire :

$$(Al_{0,004}Ti_{0,22}Fe^{3+}_{1,10})\ (Fe^{2+}_{0,07}Mg^{2+}_{1,29}Mn_{0,02})$$

L'excès de charge de 0,95 présenté par rapport à une couche octaédrique normale de mica ne peut être compensé que par une modification de la composition des hydroxyles, se traduisant comme dans le cas de l'oxydation thermique par un départ de protons.

La spectroscopie infrarouge apporte des éléments pour justifier un tel mécanisme : l'ouverture des feuillets et les premiers stades de l'oxydation qui se traduisent par des abaissements de fréquence contribueront à affaiblir la liaison OH et donc à préparer une déshydrogénation.

— Cette déshydrogénation se produira au niveau des occupations octaédriques riches en fer, du type $Fe^2Fe^{2+}Mg$ ou $Fe^{2+}Fe^{2+}Fe^{2+}$ et conduira à une simplification du spectre infrarouge avec réduction du nombre de bandes de vibration.

### 4. — *Caractérisation du matériel ouvert et oxydé à l'aide des tests de gonflement.*

Les réactions d'oxydation conduites jusqu'à leur terme sur des micas riches en fer, nous permettent d'obtenir des minéraux dont la charge est voisine de 0,50. Il était important de vérifier si le comportement de ces minéraux altérés était bien comparable à celui des homologues trouvés dans le milieu naturel.

— Si nous appliquons le test à l'éthylène glycol aux biotites traitées, on constate effectivement un gonflement qui augmente à mesure que la charge diminue (tabl. 17). Ce comportement apparaît très typique si l'on se réfère aux travaux de WALKER (1958) sur les vermiculites de différentes charges (tabl. 18).

— Par contre, le traitement au glycérol ne s'accompagne d'aucun gonflement sur les échantillons les plus évolués (charge $\leqslant 0{,}50$).

TABLEAU 17

*Comportement de différents produits expérimentaux vis-à-vis du test à l'éthylène glycol ($B_v$ = biotite de Varennes)*

| | $B_V$ NaCl $H_2O_2$ | $B_V$ NaCl | $B_V$ $MgCl_2$ | $B_V$ tétraphényl-borate | Phlogopite NaCl |
|---|---|---|---|---|---|
| Charge | 0,50 | 0,70 | 0,73 | 0,80 | 0,89 |
| *d* (001) avec Ca interfoliaire | — | 16,40 | 16,30 | 15,90 | 15,43<br>14,45 |
| *d* (001) avec Mg interfoliaire | 16,50 | 16,50 | 16<br>+ 14,15 | 14,3 | 14,15 |

TABLEAU 18

*Comportement à l'éthylène glycol de quelques vermiculites de basses charges*
(d'après WALKER, 1958)

| | Young River (W. Australie) | Nyasaland | Kenya | West Chester | Macon (N. Carolina) |
|---|---|---|---|---|---|
| Charge ..... | 0,6 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,6 |
| *d* (001) du produit Ca.. | 16,2 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 15,3 |
| *d* (001) du produit Mg . | 16,3 | 15,5 | 15,2 | 14,3 | 14,8 |

Ces produits n'ont donc pas un comportement de montmorillonite ; ils se rapprochent en revanche des beidellites (HARWARD *et al.*, 1969).

Le résultat apparaît assez logique, si on considère le taux de substitution tétraédrique. Ce taux, très élevé dans les biotites de départ, n'a pas varié en effet au cours de l'évolution, l'abaissement de la charge n'ayant concerné que les couches octaédriques (hydroxyles compris) et interfoliaires.

La filiation théorique (JACKSON *et al.*, 1952)

micas ⟶ vermiculites ⟶ montmorillonites

mise en évidence dans de nombreuses évolutions du milieu naturel (MAC EWAN, 1954 ; GYEMS, 1963 ; BRYDON *et al.*, 1968 ; TARDY, 1969) devrait donc s'écrire :

micas ⟶ vermiculites ⟶ beidellites,

filiation possible par simple transformation (échange d'ions, oxydation) alors que pour la montmorillonite, il est nécessaire d'invoquer des processus d'altération plus complexes portant en particulier sur la couche tétraédrique (enrichissement en $SiO_2$).

## C. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'OUVERTURE DE BIOTITES OXYDÉES DU MILIEU NATUREL

Pour que ces recherches puissent être utilisées pour l'interprétation des phénomènes se manifestant dans le milieu naturel, nous avons tenu à examiner le comportement des micas oxydés que l'on y trouve, afin de voir dans quelle mesure ces oxydations pouvaient avoir un effet comparable à celles que nous avons produites expérimentalement.

### 1. — *Nature du matériel choisi*

Les micas utilisés proviennent là encore du gisement de granite de Varennes et ont été extraits par séparation magnétique du niveau d'altération que l'on appelle fréquemment « l'arène granitique ». Leur étude chimique et minéralogique montre que nous avons toujours affaire à des édifices micacés [$d$ (001) = 10 Å], dont la formule structurale est indiquée dans le tableau 12 (ligne $g$). Par rapport à la biotite saine qui nous sert toujours de référence (tabl. 12, ligne $c$), on peut alors noter 3 éléments :

— 44 p. 100 du fer ferreux initial ont été oxydés au cours de la décomposition du granite ;

— abaissement de la charge interfoliaire, qui est tombée de 0,92 à 0,76 ;

— enfin, une diminution de l'occupation octaédrique, qui passe de 2,83 à 2,64 (tabl. 16).

Ce sont là d'ailleurs des caractéristiques assez classiques des biotites oxydées dans le milieu naturel (RIMSAÏTE, 1967).

### 2. — *Comportement à l'ouverture*

L'extraction du potassium de cette biotite partiellement oxydée est présentée sur la figure 25, comparativement avec les courbes obtenues pour la biotite initiale et les biotites oxydées thermiquement.

Il apparaît que :

*a*) l'aptitude à l'ouverture de la biotite partiellement oxydée du milieu naturel a *fortement diminué* ;

*b*) le taux d'extraction du potassium est voisin de celui obtenu avec la biotite chauffée à 620°C et pour laquelle d'ailleurs le degré d'oxydation est sensiblement du même ordre de grandeur (50 p. 100).

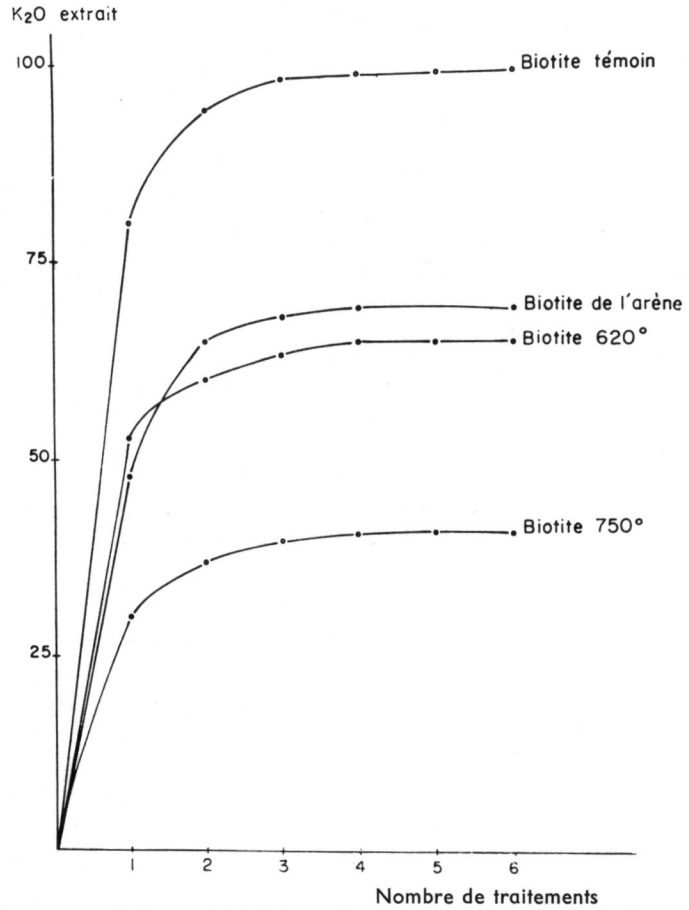



FIG. 25. — *Test au cobaltinitrite appliqué à la biotite de l'arène de Varennes* (comparaison avec la biotite fraîche et des oxybiotites)

### 3. — *Discussion sur le mode de compensation réalisé lors de l'oxydation des biotites dans le milieu naturel*

En dépit de cette similitude de comportement, on ne peut pas conclure que dans le milieu naturel, l'altération par oxydation soit identique à celle obtenue au laboratoire.

L'oxydation dans le milieu naturel va de pair en effet avec une forte diminution de la charge du feuillet (0,14), mais se traduit surtout par un départ d'ions octaédriques ; elle conduit ainsi comme l'a noté RIMSAÏTE (1967), à des biotites appauvries en $K_2O$ et intermédiaires entre des minéraux di- et trioctaédriques. De ce fait, on est là en présence d'un mode de compensation des charges différent de ceux que nous avons constatés, qui comporte essentiellement l'expulsion d'un certain nombre

de cations octaédriques suivant un mécanisme très connu en minéralogie ; on peut citer, par exemple, l'oxydation de la magnétite $Fe_3O_4[Fe^{II}Fe_2^{III}O_4]$ qui se transforme en maghémite $\gamma\ Fe_2^{III}O_4$ avec expulsion de 1/9 des ions Fe du réseau. L'effet d'extraction du fer est si net, dans les minéraux en place, dans l'arène, qu'il peut y avoir apparition de cristaux de goethite, qui se disposent en épitaxie sur les feuillets micacés en voie de dégradation.

## CONCLUSION

Ces expériences ont permis de répondre à un certain nombre de questions que l'on pouvait se poser au sujet du mécanisme de l'oxydation de certains cations octaédriques des micas, et des relations existant entre ce processus et la vermiculitisation.

1° Il faut tout d'abord bien séparer les effets de l'oxydation du processus de vermiculitisation.

— Ainsi les minéraux, même la biotite, paraissent très résistants à l'oxydation (si l'on excepte certains phénomènes superficiels concernant les premiers feuillets des cristallites).

L'oxygène de l'air, ou des oxydants énergiques comme $H_2O_2$, ne semblent pas pouvoir pénétrer entre les feuillets fermés d'un mica. Dans ces conditions, seule est possible une oxydation interne réalisée aux dépens des hydroxyles du réseau.

Par contre, l'oxydation devient plus aisée à la température ordinaire, pendant ou après l'ouverture des feuillets, par simple pénétration des agents oxydants ($H_2O$...) entre les feuillets.

2° Au cours de ces réactions, l'équilibre des charges peut se trouver réalisé par l'un au moins des 3 mécanismes suivants :

*a*) un départ de protons : c'est ce qui se produit d'une façon nette au cours de l'oxydation interne. Mais il semble également que l'on puisse invoquer un tel mécanisme lors de l'oxydation chimique d'un mica ouvert ;

*b*) une diminution de l'occupation octaédrique avec sortie d'éléments du feuillet, et on peut imaginer que ce soit là un processus de passage d'un minéral trioctaédrique vers un minéral dioctaédrique ;

*c*) enfin, un départ de cations interfoliaires, mais il faut noter que l'expulsion joue essentiellement, dans ce cas, sur des cations qui sont à ce moment-là échangeables.

3° *Si les phénomènes d'oxydation du fer et d'ouverture des feuillets (vermiculitisation) paraissent distincts* et peuvent de ce fait exister indépendamment, les relations réciproques sont cependant nombreuses :

— ainsi, il semble difficile, en milieu aqueux, d'empêcher l'oxydation de se manifester lors de l'ouverture des feuillets ;

— d'autre part, l'oxydation quel que soit le type de compensation qui l'accompagne, a des répercussions sur l'aptitude des micas à vermiculitiser.

4° Dans le cas de l'oxydation par voie thermique, la corrélation a pu être faite avec la composition quantitative et qualitative des hydroxyles sur la base des inter-

prétations proposées en spectroscopie infrarouge par VEDDER (1964-1969). Mais, une telle corrélation existe également dans le cas des biotites oxydées par voie chimique ou oxydées dans le milieu naturel.

En définitive, l'aptitude des micas à se vermiculitiser paraît être une conséquence de la constitution de la couche octaédrique. C'est bien, selon l'hypothèse de BASSETT, la répulsion des protons portés par les hydroxyles dressés qui paraît faciliter l'extraction des ions K. Par conséquent, toute modification, soit du nombre des OH par la présence de fluor ou par perte de protons, soit de leur orientation par transformation de la couche octaédrique, diminue l'aptitude à vermiculitiser. Les différences constatées, entre l'état d'oxydation du fer dans les micas sains et dans les micas altérés, ne sont pas, comme le pensait GRÜNER, à l'origine de l'évolution, mais apparaissent clairement comme une conséquence de cette évolution.

*Reçu pour publication en octobre 1970.*

## SUMMARY

EXPERIMENTAL STUDY OF THE WEATHERING OF MICAS (BIOTITES)

I. — ASPECTS OF THE VERMICULITIZATION PROCESS

The analysis refers to the two chief aspects of the vermiculitization process of tri-octahedral micas.

The first of these aspects is the opening of the layers and merely results from the replacement of potassium by more readly hydrated ions.

The second aspect relates to the additional aspects of such opening, *i. e.*, oxidation of the octahedral cations (ferrous-iron). A detailed analysis of this oxidation enables to determine its mechanism, and to establish the relation between oxidation and opening of the layers. This detailed study shows in particular the basis interactions between the composition of the octahedral layer of the micas, their hydroxilic constitution and the release of potassium.

## ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTALE UNTERSUCHUNG DER EVOLUTION DER GLIMMER (BIOTITE)

I. — ERWÄGUNGEN ÜBER DAS VERFAHREN DER VERMIKULITBILDUNG

Es handelt sich in dieser Untersuchung um die zwei hauptsächlichsten Eigenschaften der Vermikulitbildung der dreioktaedrischen Glimmer.

Die erste äussert sich durch die Aufschliessung der Blättchen und ergibt sich aus einer einfachen Ersetzung des Kaliums durch Ionen grösserer Wasseraufnahmefähigkeit.

Die zweite betrifft komplementäre Eigenschaften dieser Aufschliessung : die Oxydierung der oktaedrischen Kationen (Eisen, Eisenverbindung). An Hand einer sehr präzisen Untersuchung dieser Oxydierung ist es möglich, den Mechanismus derselben zu erklären und die bestehenden Beziehungen zwischen Oxydierung und Aufschliessung festzustellen. Sie erlaubt insbesondere die wesentlichen Einwirkungen zwischen der Zusammensetzung der oktaedrischen Schichtder Glimmer, ihrer hydroxylische Beschaffenheit und der Freigabe des Kaliums auf zu zeigen.

## РЕЗЮМЕ

*Экспериментальное изучение эволюции слюд (биотитов).*

I. Аспекты процесса вермикулитизации.

М. РОБЕР.

Автор изучал два главных аспекта процесса вермикулитизации триоктаэдрических слюд.

Первый — заключается в раскрытии пластинок вызванным простым замещением в них ионов калия, ионами более легко гидратируемыми.

Второй — относится к дополнительным аспектам этого раскрытия : окислению октаэдрических катионов (железистое железо). Очень точное изучение этого окисления дает возможность уточнить его механизм и установить соотношения существующие между окислением и раскрытием пластинок. Оно позволяет, в частности, выявить основные взаимодействия между составом октаэдрического пласта слюд, их гидроксильным строением и освобождением калия.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ADDISON W. E., SHARP J. H., 1963. Redox behaviour of Iron in hydroxyled silicates. *Clays and clay Min.*, (*IIth Nat. Conf.*), 95-104.

BARSHAD I., 1948. Vermiculite and its relation to biotite. *Am. Min.*, **33**, 655-678.

BARSHAD I., KISHK F. M., 1968. Oxidation of ferrous iron in vermiculite and biotite alters fixation and replaceability of potassium. *Science*, **162**, 3860, 1401-1402.

BASSETT W. A., 1960. Role of hydroxyl orientation in mica alteration. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **71**, 449-456.

BASSETT W. A., 1963. The geology of vermiculite occurrences. *Clays and clay Min.*, (*10th Nat. Conf.*), 61-69.

BESSON S., CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1966. Observations sur la transformation mica-vermiculite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **18**, 101-104.

BRADLEY W. F., SERRATOSA J. M., 1960. A discussion of the water content of vermiculite. *Clays and clay Min.*, (*7th Nat. Conf.*), 260-270.

BRINDLEY G. W., YOUELL R. F., 1953. Ferrous chamosite and ferric chamosite. *Min., Mag.*, **30**, 220, 57-70.

BRYDON J. E., KODAMA H., ROSS G. J., 1968. Mineralogy and weathering of the clays in orthic podzols and other podzol soils in Canada. *9th Int. Cong. of Soil Sci.*, Trans. Adelaïde, **3**, 41-51.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1958. Méthode d'utilisation des résultats de l'étude chimique d'une roche argileuse en vue de la détermination de sa composition minéralogique. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **10**, 61-70.

CHAUSSIDON J., 1970. Stretching frequencies of structural hydroxyls of hectorite and K-depleted phlogopite as influenced by interlayer cation and hydratation. *Clays and clay Min.*, **18**, 139-149.

EBERHART J. P., 1964. Sur la structure de la phase anhydre de la muscovite entre 700° et 1 000°C. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **14**, 43-52.

EUGSTER H. P., WONES D. R., 1962. Stability relations of the ferruginous biotite-annite. *Jour. Petrology*, **3**, 82-125.

FARMER V. C., RUSSEL J. D., 1966. Effects of particle size and structure on the vibrational frequencies of layer silicates. *Spectr. Acta.*, **22**, 389-398.

FARMER V. C., RUSSEL J. D., AHLRICHS J. L., VELDE B., 1967. Vibrations du groupe hydroxyle dans les silicates en couches. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **19**, 2, 5-10.

FORTUNE J.-P., MONCHOUX P., ORLIAC M., 1963. Sur les phyllosilicates associées aux ophites de Pouzac (Hautes-Pyrénées). *C. R. Acad. Sci.*, **267**, D, 387-389.

FORESTIER F. H., 1964. *Les peridotites serpentinisées en France.* Éditions B. R. G. M., 292 p.

FOSTER M. D., 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *U. S. Geol. Survey.* Prof. Paper, 354 B, 49 p.

FOSTER M. D., 1963. Interpretation of the composition of vermiculites and hydrobiotites. *Clays and clay Min.*, (*10th Nat. Conf.*), 70-89.

FRIPIAT J. J., ROUXHET P., JACOBS, 1965. Proton delocalization in micas. *Am. Min.*, **50**, 1937-1958.

GLENN R. C., JACKSON M. L., HOLE F. D., LEE G. B., 1960. Chemical weathering of layer silicate clays in loess-derived Tama silt loam of southern Wisconsin. *Clays and clay Min.*, (*8th Nat. Conf.*), 63-83.

GRÜNER J. W., 1934. The structure of vermiculite and their collapse by dehydratation. *Amer. Min.*, 557-575.

GYEMS O., 1963. A swelling dioctahedral clay mineral of a vermiculite-smectite type in the weathering horizons of podzols. *Clays Min. Bull.*, **29**, 5, 183-193.

HARWARD M. E., CARSTEA D. D., SAYEGH A. E., 1969. Properties of vermiculites and smectites : expansion and collapse. *Clays and clay Min.*, **16**, 437-447.

HÉNIN S., CAILLÈRE S., 1953. Sur l'évolution de la phlogopite à Madagascar. *XIX*$^{e}$ *Cong. Int. Géol. Alger*, **18**, 137-147.

ISMAIL F. T., 1969. Role of ferrous oxidation in the alteration of biotite and its effect on the type of clay minerals formed in soils of arid and humid regions. *Am. Min.*, **54**, 1460-1466.

JACKSON M. L., HSEUNG V., COREY R. B., EVANS E. J., VAN DEN HEUVEL R. C., 1952. Weathering sequence of clay size minerals in soils and sediments. II Chemical weathering of layer silicates. *Soil Sci Soc. Amer. Proc.*, **16**, 3-6.

JUO A. S. R., WHITE J. L., 1969. Orientation of the dipole moments of hydroxyl groups in oxidized and unoxidized biotite. *Science*, **165**, 804-805.

LACROIX A., 1940. Les transformations minéralogiques secondaires observées dans les gisements de phlogopite de l'extrême Sud de Madagascar. *C. R. Acad. Sci.*, **210**, 353-357.

MAC EWAN D. M. C., 1954. Cardenite a trioctahedral Montmorillonoïd derived from biotite. *Clay. Min. Bull.*, **2**, 120-125.

MEHMEL M., 1938. Ab und Umbau am Biotit. *Chem. der Erde*, 307-332.

MUMBRUM L. E. de, 1963. Conversion of mica to vermiculite by K removal. *Soil Sc.*, **96**, 4275-4276.

MULLER G., 1966. The relationship between the chemical composition, refractive index, and density of some coexisting biotites, muscovites, and chlorites from granitic rocks. *Geol. Int.*, **3**, 6, 1307-1322.

NEWMAN A. C. D., BROWN G., 1966. Chemical changes during the alteration of micas. *Clays Min.*, **6**, 297-309.

NEWMAN A. C. D., 1967. Changes in phlogopites during their artificial alteration. *Clays Min.*, **7**, 2, 215-227.

ORCEL J., RENAUD P., 1941. Étude du dégagement d'hydrogène associé au départ de l'eau de constitution des chlorites ferromagnésiennes. *C. R. Acad. Sci.*, **212**, 918-921.

PROST R., 1969. Remarques générales sur l'application de la spectroscopie infrarouge à l'étude des silicates. *Ann. agron.*, **6**, 547-564.

PULOU R., MONCHOUX P., VETTER P., 1961. Vermiculite de Decazeville (Aveyron). *Bull. Soc. Fr. de Min.*, **84**, 227-230.

RADOSLOVICH E. W., 1962. The cell dimension and symmetry of layer lattice silicates. *Am. Min.*, **47**, 599-636.

RAMAN K. V., JACKSON M. L., 1966. Layer charge relations in clay minerals of micaceous soils and sediments. *Clays and clay Min.*, (*15th Nat. Conf.*), 53-68.

RAUSSELL-COLOM J. A., SWEATMAN T. R., WELLS C. B., NORRISH K., 1965. *Studies in the artificial weathering of mica, experimental pedology.* Butterworths Ed., 40-72.

RIMSAITE J., 1967. Biotites intermediate between dioctahedral and trioctahedral micas. *Clays and clay Min.*, (*15th Nat. Conf.*), 375-393.

RINNE F., 1911. Baueritisierung, ein Kristallographischer Abbau dunkler Glimmer. Berichte der Math. *Phys. Kl. d. Sachs. Akad. d. Wiss. Leipzig*, LXIII Bd. 441.

RINNE F., 1924. Bemerkungen über strukturchemische Silikatformelm und den kristallographisch-chemischer ab und umbau von glimmer durch entwasserung, oxidation und reduktion. *Akad. Wiss. Leipzig*, Verh., **76**, 1-11.

ROBERT M., PEDRO G., 1965. Sur la vermiculitisation expérimentale de la phlogopite. *C. R. Acad. Sci.*, **261**, 4147-4150.

ROBERT M., PEDRO G., 1965. Transformation d'une phlogopite en vermiculite par extraction du potassium. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **17**, 3-17.

ROBERT M., PEDRO G., 1968. Étude expérimentale de l'évolution des biotites par oxydation au cours du chauffage ; constitution des oxybiotites. *C. R. Acad. Sci.*, **267**, 1677-1680.

ROBERT M., PEDRO G., 1968. Influence de l'oxydation thermique des biotites sur l'extraction du potassium (vermiculitisation). *C. R. Acad. Sci.*, **267**, 1805-1807.

ROBERT M., 1968. Étude expérimentale sur les processus de vermiculitisation des micas trioctaédriques ; bilan de l'évolution et conditions de genèse des vermiculites. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **20**, 153-171.

ROBERT M., PEDRO G., 1969. Étude des relations entre les phénomènes d'oxydation et l'aptitude à l'ouverture dans les micas trioctaédriques. *Proc. of the Int. Clay Conf.*, Tokyo, vol. I, 455-473.

ROUXHET P., 1968. *Mécanisme de réaction à l'état solide. Étude de la déshydroxylation de micas et d'hydroxydes par spectroscopie infrarouge.* Thèse Université Louvain.

SCOTT A. D., REED M. C., 1960. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solution containing sodium tetraphenylboron : I. Preliminary experiments. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, **26**, 191-194.

SCOTT A. D., REED M. C., 1962. II. Biotite. III. Illite. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, 41-48.

SCOTT A. D., 1968. Effect of particle size on interlayer potassium exchange in micas. *9th Int. Cong. of Soil Sci.*, Adelaïde, vol. 2, 649-660.

SERRATOSA J. M., BRADLEY W. F., 1958. Determination of the orientation of OH bond axes in layer silicates by infrared absorption. *Journ. Phys. Chem.*, **62**, 1164-1167.

SHANNON E. V., 1928. Vermiculite, optical data. *Am. Journ. Sci.*, **15**, 21.

SMITH AITKEN W. W., 1965. An occurrence of phlogopite and its transformation to vermiculite by weathering. *Min. Mag.*, **35**, 151-164.

TARDY Y., 1968. *Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique.* Thèse Fac. Sci. Strasbourg, 274 p.

TSVETKOV A. I., VALYASKIKHINA R. P., 1956. L'hydratation et l'oxydation des micas (en russe). *Izv Akad Nauk S. S. S. R.*, Ser. Géol., **5**, 74-83.

TSUBOI M., 1950. On the position of the hydrogen atoms in the crystal structure of muscovite as revealed by the infra-red absorption study. *Bull. chem. Soc.* (Japan), **23**, 83-88.

VAN OLPHEN H., 1965. Thermodynamics of interlayer adsorption of water in clays. I. sodium vermiculite. *J. Colloïd. Sci.*, **20**, 822-837.

VEDDER W., MAC DONALD R. S., 1963. Vibrations of the OH ions in muscovite. *Journ. Chem. Phys.*, **38**, 1583-1590.

VEDDER W., 1964. Correlations between infrared spectrum and chemical composition of mica. *Am. Min.*, **49**, 736-768.

VEDDER W., WILKINS R. W. T., 1969. Dehydroxylation and rehydroxylation, oxidation and reduction of micas. *Am. Min.*, **54**, 482-509.

WALKER G. F., 1949. The decomposition of biotite in the soil. *Min. Mag.*, **28**, 693-703.

WALKER G. F., 1958. Reactions of expanding-lattice clay minerals with glycerol and ethylene glycol. *Clay Min. Bull.*, 3, 302-313.

WALKER G. F., 1961. Vermiculite Minerals — in G. Brown. *Monograph. Mineralogical Society.*

WALKER G. F., 1963. The cation exchange reaction in vermiculite. *Int. Clay. Conf.*, Stockholm, vol. 1, 177-181.

WELLS G. B., NORRISH K., 1968. Accelerated rates of release of interlayer potassium from micas. *9th Int. Cong. of Soil. Sci.*, Adelaïde, vol. 2, 683-694.

WEY R., LE DRED R., 1967. Influence des ions échangeables sur la transformation biotite-vermiculite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **20**, 55-67.

WHITE J. L., 1959. Transformation of illite in montmorillonite. *Soil. Sc. Am. Proc.*, **15**, 129-133.

WILKINS R. T. W., 1967. The hydroxyl stretching region of the biotite mica spectrum. *Min. Mag.*, **36**, 279, 325-333.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (1), 95-111.

# ARRIÈRE-EFFET DE L'IRRIGATION SUR LE PREMIER CYCLE DE DEUX GRAMINÉES FOURRAGÈRES (*DACTYLIS GLOMERATA* L. ET *FESTUCA PRATENSIS* L).

Suzanne MÉRIAUX

avec la collaboration technique de Josette GONTHIER, C. PERREY et G. LAVIELLE

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.*
*21 - Dijon*

## RÉSUMÉ

L'arrière-effet dépressif de l'irrigation des graminées fourragères sur la production du premier cycle de l'année suivante, constaté pendant plusieurs années, peut s'expliquer par un certain épuisement des plantes irriguées soumises à une production intensive incompatible avec une reconstitution normale des réserves. Pour étudier la validité de cette hypothèse, nous avons procédé, dans le cadre d'expérimentations sur l'eau (action de l'irrigation sur le Dactyle, interaction eau-azote sur la Fétuque des Prés), à une étude portant sur :

1° l'estimation des réserves par un test biologique de repousse à l'obscurité et par des dosages biochimiques ;

2° la détermination du poids des organes de stockage de la plante.

Le sens des variations de la repousse au champ qui traduit l'arrière-action dépressive de l'irrigation est reproduit par le test biologique, alors que le taux de fructosanes des différentes parties de la plante fluctue de façon erratique. La repousse au champ croît dans le même sens que le poids des chaumes et des plateaux de tallage et la teneur en azote soluble de chacune de ces fractions.

La repousse à l'obscurité est elle-même indépendante du taux de fructosanes, mais elle est en corrélation avec le poids des chaumes et des plateaux de tallage et le poids des fructosanes des chaumes.

On peut donc penser que l'arrière-effet de l'irrigation sur le rendement du premier cycle de l'année suivante est dû à la diminution de poids des chaumes et des plateaux de tallage qu'occasionne ce traitement, ainsi qu'à l'abaissement du poids des sucres de réserve.

Une estimation prévisionnelle de l'arrière-action peut être effectuée de façon simple par la détermination du poids des organes de stockage.

## INTRODUCTION

Des observations et des mesures faites dans le cadre d'études sur l'irrigation du Dactyle et de la Fétuque des Prés dans le Centre-Est, nous ont montré que, lors du premier cycle ou cycle reproducteur, la production de matière sèche des plantes ayant

reçu un apport d'eau complémentaire l'année précédente était inférieure à celle des végétaux des parcelles témoins (MÉRIAUX, 1964).

Ce fait, vérifié sur un certain nombre d'années, pouvait s'expliquer par deux hypothèses (MÉRIAUX, 1964) :

— la première concerne la sensibilisation du système racinaire au froid de l'hiver en raison de la répartition superficielle des racines des plantes irriguées ;

— la deuxième hypothèse met en cause l'épuisement relatif de ces plantes irriguées qui, assurant une production très intense, reconstitueraient leurs réserves avec plus de difficultés que les végétaux en culture sèche. On sait en effet que les graminées fourragères utilisent après chaque coupe leurs réserves propres pour amorcer leur croissance jusqu'au stade où les feuilles produites constituent un appareil photosynthétique suffisant pour faire face aux besoins. Ces réserves présentent une importance particulière au printemps pour l'initiation des nouvelles pousses et les besoins de la montaison.

La première hypothèse fera l'objet d'études ultérieures. Dans le présent mémoire, nous nous limiterons à l'examen de la deuxième hypothèse à partir d'essais au champ concernant, d'une part l'irrigation du Dactyle, d'autre part l'interaction eau-azote chez la Fétuque des Prés.

## I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous avons utilisé successivement :

de 1960 à 1961 *Dactylis glomerata* L. variété C B
de 1961 à 1967 *Dactylis glomerata* L. variété Floréal
de 1968 à 1969 *Festuca pratensis* L. variété Naïade.

Ces deux graminées étaient cultivées en plein champ sur sol argileux présentant une réserve hydrique de 100 mm (MÉRIAUX et PERREY, 1961 ; MÉRIAUX, 1963).

### 1. 1. — *Traitements étudiés*

1. 11. *Traitement principal.*

Le but de l'étude étant l'arrière-action de l'irrigation, le traitement principal est le *traitement hydrique*. Il consiste à envisager l'action de l'eau à deux niveaux :

A. — Précipitations naturelles (P),
B. — Alimentation en eau correspondant à l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de BOUCHET (1960), et nécessitant une irrigation (I) en complément des précipitations naturelles (P).

Les valeurs de I et de P durant la saison de végétation, pour les années concernées, sont les suivantes (en mm) :

| Année | 1960 | 1961 | 1963 | 1964 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 660 | 329 | 516 | 299 | 481 | 464 | 613 | 449 |
| I | 305 | 350 | 311 | 681 | 422 | 523 | 259 | 375 |
| P + I | 965 | 679 | 827 | 980 | 903 | 987 | 872 | 824 |

1. 12. *Traitement secondaire.*

L'étude sur la Fétuque des Prés ayant porté sur l'interaction eau-azote, au cours des années 1968 et 1969, trois doses d'azote (sous forme de $NH_4NO_3$) seront en outre prises en considération (*traitement azoté*).

I : 150 kg de N par hectare et par an apportés à chaque cycle selon le fractionnement 50, 25, 25, 25, 25 ;

II : 300 kg de N par hectare et par an apportés à chaque cycle selon le fractionnement 100, 50, 50, 50, 50 ;

III : 600 kg de N par hectare et par an apportés à chaque cycle selon le fractionnement 200, 100, 100, 100, 100.

Signalons que pour le Dactyle où seule l'influence de l'eau était étudiée, l'apport uniforme d'azote correspondait à 390 kg de N par hectare et par an avec le fractionnement 100, 80, 80, 80, 50.

### 1. 2. — *Technique biologique d'appréciation des réserves*

Nous avons appliqué, en l'adaptant, la technique de SPRAGUE, citée par DRAKE *et al.* (1963). Elle consiste à mesurer la matière sèche des feuilles produites en l'absence de toute photosynthèse par des plantes ayant séjourné à l'obscurité, dans des conditions d'alimentation en eau non limitantes, à la température arbitraire de 24°C. Dans ce but, en 1968 et 1969, après la récolte du 5e cycle végétatif de la Fétuque des Prés, nous avons prélevé des mottes cubiques de sol de 20 cm d'arête contenant une touffe de graminée. Ces blocs ont séjourné en chambre noire pendant 10 jours à l'issue desquels la matière sèche des parties aériennes produites était pesée. Les parties restantes étaient ensuite séparées en plusieurs fractions :

— deux fractions en 1968 : chaumes et plateaux de tallage d'une part, racines proprement dites d'autre part ;

— trois fractions en 1969 : chaumes, plateaux de tallage et racines.

### 1. 3. — *Préparation du matériel végétal pour les dosages biochimiques*

Les techniques employées ont été décrites en détail par LEFEBVRE-DROUET (1970).

Les plantes recueillies en mottes cubiques après la dernière récolte de l'année (5e coupe, début novembre) sont séparées en 3 lots puis pesées. Nous distinguons :

— la fraction 1 correspondant approximativement aux chaumes ou collets selon certains auteurs (BAKER, 1957 ; VENGRIS *et al.*, 1966);

— la fraction 2, zone du plateau de tallage ;

— la fraction 3 formée de racines situées entre — 2 cm et — 20 cm.

Chaque fraction de matériel est stabilisée par l'éthanol (96°GL) à l'ébullition. A partir de ce matériel fixé, les extractions des glucides solubles et de l'azote soluble sont effectuées par l'éthanol (80 p. 100). Malgré les risques d'extraction incomplète des formes azotées solubles par l'éthanol à 80 p. 100, nous avons utilisé ce titre plutôt que celui de 50 p. 100 préconisé par LEFEBVRE (1958) car dans ce dernier cas, les gluco-fructosanes type inuline, auraient été extraits en même temps que les autres glucides.

Les fructosanes non extraits par l'éthanol 80 p. 100 sont solubilisés par l'eau au bain-marie bouillant à partir du résidu de l'extraction alcoolique précédente.

### 1. 4. — *Dosages biochimiques sur les végétaux*

*Glucides.*

Les sucres solubles totaux et les sucres réducteurs, après hydrolyse par HCl à pH 2 au bain-marie bouillant, sont dosés par la méthode de SOMOGYI (1952).

La même méthode est appliquée au dosage du saccharose après action de l'invertase (LEFEBVRE et JOLIET, 1967).

Pour les fructosanes, nous avons appliqué la méthode au résorcinol alcoolique (WILLIARD *et al.*, 1945).

*Composés azotés.*

L'azote total est dosé sur la poudre végétale par la méthode de Kjeldhal après réduction des nitrates.

La même méthode est appliquée à l'azote soluble.

L'azote protéique est obtenu par différence.

## II. — RÉSULTATS

### 2. 1. — *Dactyle*

### 2. 11. *Arrière-effet de l'irrigation sur la matière sèche produite au champ au cours du premier cycle.*

Compte tenu des conditions climatiques locales, le premier cycle végétal est rarement soumis à l'irrigation. Il peut donc valablement servir à mesurer un arrière-effet.

A partir de la deuxième année de végétation, la production de matière sèche de ce cycle est affectée de façon significative trois années sur quatre par l'apport d'eau de la campagne précédente (tabl. 1).

TABLEAU I

*Arrière-effet de l'irrigation sur la production de matière sèche par le Dactyle au cours de son premier cycle*

| Année : | Traitement hydrique | | | |
|---|---|---|---|---|
| | A (témoin) | B (irrigué) | P.p.d.s. 5 % | Apport d'eau au cycle (mm) |
| 1er essai 1963 (2e année) | t/ha 2,875 | 1,870 | 0,24 | 0 |
| | indice 100 | 65 | 8,4 | |
| 1er essai 1964 (3e année) | t/ha 4,880 | 3,920 | 0,92 | 0 |
| | indice 100 | 80 | 19 | |
| 2e essai 1966 (2e année) | t/ha 4,510 | 4,175 | N.S. | 0 |
| | indice 100 | 93 | | |
| 2e essai 1967 (3e année) | t/ha 4,310 | 3,470 | 0,41 | 82,4 |
| | indice 100 | 80 | 9 | |

### 2. 12. *Répartition pondérale des différentes parties de la plante.*

Le tableau 2 indique la répartition pondérale entre les chaumes (fraction 1), les plateaux de tallage (fraction 2) et les racines (fraction 3) lors du prélèvement effectué en novembre 1967 sur le Dactyle aux fins d'analyses. L'irrigation entraîne un accroissement de la masse du végétal sans modifier les proportions entre les fractions considérées.

TABLEAU 2

*Répartition pondérale des différentes fractions séparées du Dactyle*
(en matière sèche par motte cubique)

| Traitement hydrique | Témoin | | Irrigué | |
|---|---|---|---|---|
| | Poids en g | % du total | Poids en g | % du total |
| Chaumes (fraction 1) ... | 11,6 | 25,5 | 14,6 | 27,0 |
| Plateaux de tallage (fraction 2)..... | 25,3 | 56,0 | 29,6 | 54,5 |
| Racines (fraction 3) .... | 8,5 | 18,5 | 10,2 | 18,5 |
| Total des 3 fractions ... | 45,4 | | 54,4 | |

2. 13. *Proportion relative des différents sucres dans les trois fractions de la plante.*

Le tableau 3 montre que le taux de fructosanes est le plus important dans la fraction 1 (chaumes) et dans une moindre mesure dans la fraction 2 (plateaux de tallage), tandis qu'il est faible dans la fraction 3 (racines).

Compte tenu de la variation des glucides solubles, les fructosanes représentent une proportion importante des glucides totaux dans les chaumes et les plateaux de tallage.

2. 14. *Variation des glucides avec l'irrigation.*

L'irrigation entraîne un accroissement des glucides solubles totaux et du saccharose dans les plateaux de tallage uniquement (fraction 2). Il en résulte une diminution de la proportion de fructosanes par rapport aux glucides totaux dans cette fraction (tabl. 3).

2. 15. *Variation des composés azotés avec l'irrigation.*

La seule action significative concerne la diminution du taux d'azote total (tabl. 3).

### 2. 2. — *Fétuque des Prés*

2. 21. *Arrière-effets combinés de l'irrigation et de l'azote sur la repousse de la Fétuque des Prés au champ en « avant-premier cycle ».*

En 1969, nous avons cherché à mesurer au champ, sur Fétuque des Prés, une repousse qui traduise au mieux l'utilisation des réserves de la plante. Dans ce but, aucun apport d'azote n'a été fait au printemps et la Fétuque a été coupée précocement (22 avril au lieu du 9 mai en première coupe normale). Les plantes étaient alors très peu développées par suite de l'absence d'engrais azoté ; au départ de la végétation, la teneur en azote minéral du sol était très faible (5 à 10 kg par hectare pour la couche de 0 à 30 cm). Nous pouvons donc considérer que la matière sèche ainsi produite (très faible comme le montre le tableau 4) rend compte essentiellement de l'utilisation des réserves car les végétaux n'avaient pas de grandes possibilités de photosynthèse. Cette production est de l'ordre de grandeur de celle des repousses à l'obscurité obtenues par le test de SPRAGUE. Compte tenu de la faible valeur des

TABLEAU 3

*Composition azotée et glucidique des différentes parties du Dactyle*
(en p. 100 de matière sèche) *novembre 1967* (moyenne de 6 répétitions)

| | Azote | | | Glucides solubles | | | Fructosanes | Glucides totaux | Fructosanes % de glucides totaux |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | total | soluble | protéique | totaux | réducteurs | saccharose | | | |
| Fraction 1 | | | | | | | | | |
| A (1) | 1,80 | 1,08 | 0,71 | 3,29 | 1,26 | 1,62 | 10,34 | 13,63 | 75,9 |
| B (2) | 1,40 | 0,79 | 0,64 | 3,13 | 1,20 | 1,86 | 12,02 | 15,15 | 79,3 |
| P.p.d.s. 5 % | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | | |
| Fraction 2 | | | | | | | | | |
| A (1) | 1,30 | 0,51 | 0,81 | 1,77 | 0,53 | 1,16 | 5,33 | 7,10 | 75,1 |
| B (2) | 1,10 | 0,40 | 0,71 | 2,31 | 0,49 | 1,65 | 5,18 | 7,49 | 69,1 |
| P.p.d.s. 5 % | 0,16 | N.S. | N.S. | 0,47 | N.S. | 0,43 | N.S. | | |
| Fraction 3 | | | | | | | | | |
| A (1) | 0,96 | 0,61 | 0,35 | 2,44 | 0,95 | 1,04 | 0,66 | 3,10 | 21,3 |
| B (2) | 0,81 | 0,51 | 0,30 | 2,46 | 1,20 | 1,04 | 0,77 | 3,23 | 23,8 |
| P.p.d.s. 5 % | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | N.S. | | |

(1) A = Témoin.
(2) B = Irrigué.
N.S. = Non significatif.

quantités produites et donc des causes d'erreur qui l'entourent, nous ne retiendrons que le sens des variations qui confirme l'arrière-action dépressive de l'irrigation, d'autant plus marquée que la dose d'azote est plus élevée.

TABLEAU 4

*Arrière-effet de l'irrigation sur la production au champ de matière sèche par la Fétuque des Prés* (estimation des réserves) *22 avril 1969* (2e année)

| Traitement azoté | I | | II | | III | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Traitement hydrique | Témoin | Irrigué | Témoin | Irrigué | Témoin | Irrigué |
| kg/ha | 43,2 | 36,4 | 87,6 | 65,6 | 88,4 | 42,8 |
| Indice | 100 | 84 | 100 | 75 | 100 | 48 |

2. 22. *Étude de la répartition pondérale des différentes fractions de la plante.*

Les échantillons de Fétuque des Prés prélevés pour analyses en novembre 1968 et novembre 1969 présentaient entre les fractions 1, 2 et 3 (représentant respectivement les chaumes, les plateaux de tallage et les racines) la répartition pondérale qui figure au tableau 5 (moyenne de 4 déterminations). Afin de disposer d'un plus grand nombre de résultats, nous pouvons en outre prendre en considération les données du tableau 6 qui indique la répartition des différentes fractions après repousse à l'obscurité.

TABLEAU 5

*Répartition pondérale des différentes fractions séparées de la Fétuque des Prés* (en matière sèche par motte cubique)

| Traitement azoté | I | | | | III | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Témoin | | Irrigué | | Témoin | | Irrigué | |
| Traitement hydrique | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total |
| 1968 | | | | | | | | |
| Fraction 1 | 2,2 | 8,0 | 1,7 | 7,0 | 1,6 | 8,5 | 1,9 | 9,5 |
| Fraction 2 | 8,8 | 33,5 | 6,0 | 24,5 | 8,6 | 46,0 | 8,0 | 39,5 |
| Fraction 3 | 15,9 | 59,0 | 16,7 | 68,5 | 8,5 | 45,5 | 10,4 | 51,0 |
| Total des 3 fractions | 26,9 | | 24,4 | | 18,7 | | 20,3 | |
| 1969 | | | | | | | | |
| Fraction 1 | 2,8 | 15,0 | 2,7 | 13,0 | 1,9 | 17,5 | 2,3 | 13,5 |
| Fraction 2 | 7,3 | 40,0 | 8,2 | 39,0 | 5,2 | 47,5 | 7,7 | 45,5 |
| Fraction 3 | 8,2 | 45,0 | 10,1 | 48,0 | 3,8 | 35,0 | 6,9 | 41,0 |
| Total des 3 fractions | 18,3 | | 21,0 | | 10,9 | | 16,9 | |

Fraction 1 = chaumes.
Fraction 2 = plateaux de tallage.
Fraction 3 = racines.

I = 150 kg de N par ha et par an.
III = 600 kg de N par ha et par an.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CENTRE DE GRIGNON
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL

## TABLEAU 6

*Matière sèche* (ou fraîche) *des différentes parties de la Fétuque des Prés après repousse à l'obscurité* (par motte cubique) (Moyenne de 5 répétitions)

1968

| Traitement azoté | I | | | | III | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Traitement hydrique | Témoin | | Irrigué | | Témoin | | Irrigué | |
| | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total |
| Matière sèche produite à l'obscurité (parties aériennes) | 1,2 | | 1,0 | | 1,1 | | 0,9 | |
| Matière fraîche (*a*) des chaumes et plateaux de tallage (fraction 1 et 2) | 20,7 | 25,0 | 18,7 | 18,5 | 17,9 | 20,5 | 12,5 | 10,0 |
| Matière fraîche des racines (fraction 3) | 63,2 | 75,0 | 82,0 | 81,5 | 68,4 | 79,5 | 112,8 | 90,0 |
| Somme des 3 fractions | 83,9 | | 100,7 | | 86,3 | | 125,3 | |

1969

| Traitement azoté | I | | | | II | | | | III | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Traitement hydrique | Témoin | | Irrigué | | Témoin | | Irrigué | | Témoin | | Irrigué | |
| | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total | Poids (en g) | % du total |
| Matière sèche produite à l'obscurité (parties aériennes) | 1,4 | | 1,0 | | 1,4 | | 1,4 | | 1,3 | | 1,7 | |
| Matière sèche des chaumes (fraction 1) | 3,8 | 14,0 | 2,6 | 9,5 | 2,3 | 11,5 | 3,1 | 11,0 | 1,9 | 12,5 | 3,0 | 14,0 |
| Matière sèche des plateaux de tallage (fraction 2) | 7,9 | 29,0 | 7,3 | 26,0 | 6,4 | 32,0 | 8,2 | 29,5 | 5,1 | 32,5 | 8,9 | 41,0 |
| Matière sèche des racines (fraction 3) | 15,5 | 57,0 | 18,2 | 64,5 | 11,2 | 56,5 | 16,4 | 59,5 | 8,6 | 55,0 | 9,7 | 45,0 |
| Somme des 3 fractions | 27,2 | | 28,1 | | 19,9 | | 27,7 | | 15,6 | | 21,6 | |
| Parties aériennes % de la somme des 3 fractions | 5,1 | | 3,6 | | 7,0 | | 5,1 | | 8,3 | | 7,9 | |

(*a*) A la suite de difficultés techniques, seule la matière fraîche a été déterminée après essorage suivi d'un ressuyage de 24 heures.

Quelques observations découlent de ces deux tableaux :

— la fraction 3 est en général la plus importante ;

— l'irrigation a une action variable sur le poids total des 3 fractions, mais elle entraîne toujours un accroissement, plus ou moins important, du poids de la fraction 3 ;

— l'azote diminue presque toujours le poids total et le poids de la fraction 3 (à l'exception de la repousse 1968, tabl. 6).

2. 23. *Appréciation biologique des réserves de la Fétuque des Prés.*

Le tableau 6 donne les résultats obtenus par le test de repousse à l'obscurité pendant 10 jours en 1968 et 1969. Il s'en dégage une tendance à l'obtention de repousses plus importantes dans le cas des traitements non irrigués (à l'exception des traitements II et III en 1969). Ces résultats sont conformes aux observations initiales au champ.

2. 24. *Composition glucidique des différentes fractions de la plante.*

2. 241. *Proportion relative des différents sucres dans les trois fractions de la plante.*

Les tableaux 7 et 8 font apparaître un taux de fructosanes élevé dans les chaumes (fraction 1) et de moindre importance dans les plateaux de tallage et les racines. Il

TABLEAU 7

*Composition glucidique des différentes parties de la Fétuque des Prés*
(en p. 100 de matière sèche)
*novembre 1968*

| | Glucides solubles | | | Fructosanes | Glucides totaux | Fructosanes % de glucide totaux |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | totaux | réducteurs | saccharose | | | |
| Fraction 1 | | | | | | |
| A (1) I | 5,53 | 1,83 | 2,60 | 17,81 | 23,04 | 77,4 |
| A (1) III | 4,53 | 2,26 | 2,06 | 11,12 | 15,65 | 71,0 |
| B (2) I | 7,56 | 2,67 | 3,94 | 15,68 | 23,24 | 67,4 |
| B (2) III | 5,98 | 2,40 | 3,37 | 11,04 | 17,02 | 64,9 |
| P.p.d.s. 5 % | 1,44 | 0,50 | 1,20 | 4,14 | | |
| Fraction 2 | | | | | | |
| A (1) I | 2,89 | 0,97 | 1,66 | 10,94 | 13,83 | 79,1 |
| A (1) III | 2,49 | 0,74 | 1,32 | 4,47 | 6,96 | 64,1 |
| B (2) I | 4,24 | 1,52 | 2,25 | 10,36 | 14,60 | 70,9 |
| B (2) III | 3,31 | 1,11 | 1,95 | 7,31 | 10,62 | 68,8 |
| P.p.d.s. 5 % | 0,77 | 0,43 | 0,60 | 2,50 | | |
| Fraction 3 | | | | | | |
| A (1) I | 3,02 | 0,56 | 1,69 | 8,86 | 11,88 | 76,3 |
| A (1) III | 2,89 | 1,17 | 1,55 | 4,48 | 7,37 | 60,8 |
| B (2) I | 3,65 | 0,64 | 1,83 | 9,09 | 12,74 | 71,3 |
| B (2) III | 2,99 | 1,03 | 1,67 | 7,06 | 10,05 | 70,2 |
| P.p.d.s. 5 % | N.S. | 0,15 | N.S. | 1,87 | | |

(1) A = témoin.
(2) B = irrigué.

en est de même pour les glucides solubles. En conséquence, les gluco-fructosanes représentent une proportion élevée et à peu près constante des glucides totaux dans les trois fractions de la plante.

TABLEAU 8

*Composition glucidique des différentes parties de la Fétuque des Prés*
(en p. 100 de matière sèche)
*novembre 1969*

| | Glucides solubles | | | Fructosanes | Glucides totaux | Fructosanes % de glucides totaux |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Totaux | Réducteurs | Saccharose | | | |
| Fraction 1 | | | | | | |
| A (1) I | 5,79 | 2,00 | 3,57 | 14,74 | 20,53 | 71,8 |
| A (1) III | 6,37 | 2,54 | 3,73 | 11,34 | 17,71 | 64,0 |
| B (2) I | 5,44 | 1,91 | 2,96 | 15,34 | 20,78 | 73,8 |
| B (2) III | 5,82 | 2,33 | 3,22 | 13,16 | 18,98 | 69,3 |
| P.p.d.s. 5 % | N.S. | N.S. | 0,58 | N.S. | | |
| Fraction 2 | | | | | | |
| A (1) I | 3,88 | 1,29 | 2,55 | 5,49 | 9,37 | 58,6 |
| A (1) III | 4,36 | 1,39 | 2,71 | 1,81 | 6,17 | 29,3 |
| B (2) I | 3,68 | 1,27 | 2,08 | 8,89 | 12,57 | 70,7 |
| B (2) III | 3,63 | 1,24 | 2,06 | 5,76 | 9,35 | 61,2 |
| p.p.d.s. 5 % | N.S. | N.S. | N.S. | 2,22 | | |
| Fraction 3 | | | | | | |
| A (1) I | 3,38 | 1,22 | 2,03 | 3,36 | 6,74 | 49,9 |
| A (1) III | 4,90 | 2,37 | 2,58 | 3,79 | 8,69 | 43,6 |
| B (2) I | 3,40 | 0,97 | 2,11 | 8,55 | 11,95 | 71,5 |
| B (2) III | 3,65 | 1,29 | 2,28 | 4,24 | 7,89 | 53,7 |
| P.p.d.s. 5 % | 0,82 | 0,56 | N.S. | 1,44 | | |

(1) A = témoin.
(2) B = irrigué.

Ces résultats, conformes à ceux d'un certain nombre d'auteurs, parmi lesquels WAITE et BOYD (1953), BAKER (1957), LEFEBVRE-DROUET (1969), mettent en évidence l'accumulation de ces sucres de réserve en majorité dans les chaumes.

2. 242. *Variation des glucides avec l'irrigation.*

En 1968, il est observé une élévation du taux de glucides solubles dans les chaumes et les plateaux de tallage des végétaux irrigués. Cet accroissement semble plus marqué avec les faibles doses d'azote qu'avec les fortes doses. On note aussi, grâce à l'irrigation, un accroissement des glucides réducteurs dans les racines ainsi que des fructosanes dans les plateaux de tallage et les racines pour la forte dose d'azote.

En 1969, l'irrigation entraîne peu d'effets sur les teneurs en glucides solubles, si ce n'est, à l'inverse de 1968, un abaissement du taux de saccharose dans les chaumes

et du taux de glucides solubles réducteurs dans les racines. La teneur en fructosanes est accrue par l'irrigation dans les plateaux de tallage et les racines.

2. 243. *Variation des glucides avec la fumure azotée.*

L'accroissement de la quantité d'azote apporté se traduit par une diminution corrélative de la teneur en fructosanes. Quant au taux de glucides solubles, il n'est abaissé par la fertilisation azotée qu'en 1968. Signalons que LEFEBVRE et JOLIET (1968) ont observé régulièrement cette variation inverse sur les parties aériennes du Dactyle.

2. 25. *Variation des composés azotés dans différentes fractions de la plante en relation avec les traitements.*

2. 251. *Action de l'irrigation.*

D'après le tableau 9, on observe généralement dans les trois fractions, pour la forte dose d'azote, un abaissement de la teneur en azote total et soluble des végétaux, provoqué par l'irrigation. Cet effet est rarement constaté pour la dose faible d'azote. Quant à l'azote protéique, ses variations significatives liées à l'action de l'apport d'eau sont plus rares et erratiques.

TABLEAU 9

*Composition azotée des différentes parties de la Fétuque des Prés*
(en p. 100 de matière sèche)
(Prélèvements effectués en novembre 1968 et 1969)

| | | 1968 | | | 1969 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | N total | N soluble | N protéique | N total | N soluble | N protéique |
| | Fraction 1 | | | | | | |
| A (1) | I | 1,10 | 0,99 | 0,11 | 1,19 | 0,51 | 0,68 |
| | III | 1,98 | 1,18 | 0,70 | 2,62 | 1,52 | 1,10 |
| B (2) | I | 0,96 | 0,52 | 0,44 | 1,16 | 0,55 | 0,61 |
| | III | 1,58 | 1,14 | 0,44 | 1,80 | 0,85 | 0,95 |
| | p.p.d.s. 0,05 | 0,28 | 0,29 | 0,30 | 0,33 | 0,31 | N.S. |
| | Fraction 2 | | | | | | |
| A (1) | I | 0,96 | 0,57 | 0,39 | 1,19 | 0,38 | 0,81 |
| | III | 1,64 | 0,80 | 0,84 | 2,07 | 0,71 | 1,36 |
| B (2) | I | 0,94 | 0,49 | 0,45 | 0,97 | 0,36 | 0,61 |
| | III | 1,40 | 0,64 | 0,76 | 1,73 | 0,54 | 1,19 |
| | p.p.d.s. 0,05 | 0,27 | 0,14 | 0,22 | 0,18 | 0,12 | 0,25 |
| | Fraction 3 | | | | | | |
| A (1) | I | 0,75 | 0,34 | 0,41 | 0,88 | 0,28 | 0,60 |
| | III | 1,20 | 0,68 | 0,52 | 1,47 | 0,89 | 0,58 |
| B (2) | I | 0,71 | 0,24 | 0,47 | 0,83 | 0,23 | 0,60 |
| | III | 1,05 | 0,38 | 0,67 | 1,30 | 0,53 | 0,77 |
| | p.p.d.s. 0,05 | 0,11 | 0,22 | 0,12 | 0,14 | 0,08 | 0,14 |

(1) A = témoin.
(2) B = irrigué.

2. 252. *Action de la fumure azotée.*

Ainsi que de nombreux auteurs l'ont souligné pour les parties aériennes, en particulier LEFEBVRE et JOLIET (1968), l'accroissement de la fertilisation azotée se traduit par une augmentation systématique de l'azote total et de l'azote soluble, augmentation plus importante dans les plantes-témoins que dans les plantes irriguées. L'accroissement du taux d'azote protéique est surtout sensible dans les plateaux de tallage.

## III. — DISCUSSION

Les résultats présentés sur le Dactyle ont surtout permis de mettre en évidence l'arrière-action dépressive de l'irrigation. Ceux qui concernent la Fétuque des Prés permettent en outre de dégager une méthode simple d'estimation prévisionnelle de l'arrière-action en approfondissant les raisons de cette arrière-action.

### *La repousse au champ est-elle en corrélation avec les réserves telles qu'elles ont été appréciées dans cette étude ?*

Si l'on rapproche les résultats de la repousse évaluée au champ du printemps 1969 (tabl. 4) de ceux du test de SPRAGUE de l'automne 1968 (tabl. 6), on note dans les deux cas, une arrière-action dépressive de l'irrigation. Par contre, les résultats sont divergents quant à l'arrière-effet des fortes doses d'azote (traitement III). Pour le traitement non irrigué, cet arrière-effet est positif au champ et tend à être négatif dans le test biologique.

Il semble donc que la repousse soit toujours influencée par le passé hydrique, mais qu'elle ne subisse l'action dépressive de fortes doses d'azote que dans un délai limité qui pourrait mettre en cause des facteurs tels que la salinité du milieu, et non la reconstitution des réserves.

La comparaison des résultats des tableaux 4 et 7 montre qu'aucune relation ne peut être établie entre la repousse au champ au printemps et la teneur en sucres de réserve des différentes parties des plantes prélevées à l'automne précédent. Ce manque de relation s'explique par le fait que l'hydrolyse des glucofructosanes est rapide au cours de l'hiver (LEMOIGNE, 1942 ; BAKER, 1957).

### *La repousse au champ est-elle liée à certaines caractéristiques de la plante ?*

Le rapprochement des tableaux 4 et 5 (1968) fait apparaître pour les repousses au champ une variation qui se fait généralement dans le même sens que celle relative au pourcentage pondéral des chaumes et des plateaux de tallage mais en sens inverse de celle concernant les racines. Indépendamment de l'action propre des traitements eau et azote, il se dégage donc une relation entre la repousse et la masse des organes de stockage des éléments.

Par ailleurs (tabl. 9), on constate que la repousse varie dans le même sens que la teneur en azote soluble des chaumes et des plateaux de tallage des plantes prélevées à l'automne précédent. Cette variation parallèle s'explique par le fait que la

repousse au champ se produit au printemps en l'absence d'azote apporté. Dans ces conditions, le facteur qui limite la synthèse protéique à une époque où la plante photosynthétise à l'aide des jeunes feuilles, serait une fourniture insuffisante à partir des protéines de réserve, des composés organiques simples tels que les amino-acides nécessaires à de nouvelles synthèses avec les glucides néoformés.

### *Les réserves de la plante peuvent-elles être appréciées par des mesures de laboratoire ?*

Le test biologique faisant appel aux réserves de la plante, sans préjuger la nature de ces réserves, se présente *a priori* comme devant rendre compte de façon objective de l'état d'épuisement de cette plante.

Toutefois, sa mise en œuvre faisant appel à des plantes prélevées au champ l'entache d'une certaine imprécision. Nous avons recherché des corrélations possibles entre les résultats donnés par ce test et ceux que fournissent d'autres déterminations pouvant représenter une approche d'appréciation des réserves. Aucune corrélation significative n'existe entre la matière sèche produite à l'obscurité et la teneur en fructosanes de chacune des trois fractions de la plante (fructosanes exprimés en p. 100 de matière sèche ou en p. 100 de glucides totaux).

Par contre, le tableau 6 montre qu'au cours des deux années d'étude, la repousse à l'obscurité varie dans le même sens que le poids des chaumes et des plateaux de tallage et à l'inverse du poids des racines.

Des corrélations hautement significatives existent entre la matière sèche produite à l'obscurité ($y$) et le poids de matière sèche des chaumes ($x_1$) et des plateaux de tallage ($x_2$). Elles se traduisent par les équations de régression suivantes (hautement significatives) obtenues en 1969 (en 1968, les fractions ayant été estimées en matière fraîche, les corrélations n'ont pas été recherchées) :

$$y = 0{,}63 + 0{,}26x_1$$
$$y = 0{,}59 + 0{,}106x_2$$
$$y = 0{,}48 + 0{,}087(x_1 + x_2)$$

Ces données confirment donc l'effet important exercé sur la repousse par la masse de certaines parties de la plante où s'accumulent les réserves.

Cette action se traduit avec plus d'acuité si l'on exprime la repousse en fonction du rapport ($x_3$) des poids de chaumes et de plateaux de tallage sur le poids des racines :

$$y = 0{,}88 + 0{,}579x_3 \text{ (régression hautement significative).}$$

A partir des conclusions précédentes concernant l'influence des chaumes et des plateaux de tallage sur la repousse, nous avons cherché à savoir si le poids de sucres de réserves pouvait être en relation avec la matière sèche produite à l'obscurité. Nous avons trouvé une corrélation hautement significative entre la repousse ($y$) et le poids de fructosanes des chaumes ($x'_1$) [1] en 1969. L'équation en est :

$$y = 0{,}79 + 1{,}32x'_1$$

[1] Il s'agit là du poids total de fructosanes des chaumes et non de la teneur en fructosanes de ces derniers ; comme il est précisé plus haut, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre cette teneur et la matière sèche produite à l'obscurité.

Par contre, la repousse n'est pas en corrélation avec le poids de fructosanes des plateaux de tallage.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux de BAKER (1957) qui, étudiant l'action de la coupe sur la production de racines, de chaumes et de feuilles de Ray-grass conclut que le poids de fructosanes dans chaque fraction de la plante est plus intéressant à considérer que le taux de ces sucres.

## IV. — CONCLUSIONS

En résumé des données exposées dans ce travail, nous pouvons dégager une cause de l'arrière-action dépressive de l'irrigation : le poids des organes de stockage tels que les chaumes et la zone des plateaux de tallage est en général diminué par ce traitement intensif et, en conséquence, la quantité de sucres de réserve qui s'y trouve accumulée est réduite.

En outre, il apparaît que le test de SPRAGUE qui donne une indication des possibilités immédiates de repousse de la plante peut être remplacé par la détermination du poids de ces organes qui est d'une exécution plus simple. Par contre, le taux de fructosanes des fractions de la plante ne semble pas rendre compte de l'état d'épuisement de la plante.

Il convient toutefois de signaler que le test de SPRAGUE peut refléter des arrière-actions d'ordre trophique (azote) qui ne se manifestent pas au champ, au printemps suivant. En effet, à l'obscurité, la plante se trouve en état de déficit énergétique par le manque de photosynthèse : une partie des glucides résultant de l'hydrolyse des fructosanes est utilisée comme substrat respiratoire au lieu de servir de chaînon carboné de base pour la synthèse des amino-acides. Lorsque, comme en 1968, l'action de l'apport d'azote se traduit par une diminution notable du taux de sucres solubles et surtout de fructosanes, le déficit glucidique croît avec la dose d'azote et entraîne un abaissement de la production. Par contre, en plein champ, même à des dates précoces, une certaine photosynthèse se produit qui satisfait une partie des besoins en énergie et en chaînons carbonés.

*Reçu pour publication en décembre 1970.*

## SUMMARY

IRRIGATION AFTER-EFFECT ON THE FIRST AGRICULTURAL CYCLE OF TWO GRAMINACEOUS GRASSES (*DACTYLIS GLOMERATA* L. ET *FESTUCA PRATENSIS* L.)

The adverse irrigation after-effect on the yield of graminaceous grasses during the first agricultural cycle over several years may be due to some depletion of the irrigated plant when subjected to intensive cultivation incompatible with proper build-up of reserves. To ascertain the validity of this assumption we have proceeded, within the scope of water experimentation,

(irrigation effects on the Dactyles, water/nitrogen interaction on the Meadow Fescue), with an investigation referring to :

1. the assessment of the reserves by a regrowth biological test in darkness, and also biochemical determinations ;

2. weighing of the plant storage organs.

The variational trend of regrowth in tilled land, showing the adverse irrigation after-effects, is reproduced by the biological test, whereas the fructosane rate in the various parts of the plant changes erratically. Re-growth in tilled land increases with the weight of the stubble, the tillering sprouts and the soluble-nitrogen content in each of these fractions.

Re-growth in darkness is itself unrelated with the fructosane weight but correlates with the weight of the stubble, the tillering sprouts and that of the fructosanes in the stubble.

This may conduce to consider that the irrigation after-effects on the yield over the first agricultural cycle of the following year is due to the reduced weight of the stubble and tillering sprouts brought about by such treatment, and also to the lower weight of the stored sugars.

The after-effect can be estimated and forecast by determining the weight of the storage organs.

## ZUSAMMENFASSUNG

### NACHWIRKUNG DER BEWÄSSERUNG AUF DEN ERSTEN ZYKLUS VON ZWEI FUTTERGRÄSERN (*DACTYLIS GLOMERATA* L., UND *FESTUCA PRATENSIS* L.)

Die im Laufe von meheren Jahren festgestellte depressive Nachwirkung der Bewässerung der Futtergräser auf die im folgenden Jahre erzielte Produktion des ersten Zyklus erklärt sich durch eine gewisse Erschöpfung der bewässerten Pflanzen, die einer intensiven und mit einer normalen Wiedererstellung der Vorräte unverträglichen Produktion unterworfen wurden. Um die Gültigkeit dieser Hypothese zu prüfen, haben wir im Rahmen von mit Wasser durchgeführten Versuchen (Wirkung der Bewässerung auf das Knaulgras, Interaktion Wasser-Stickstoff auf den Wiesenschwingel) eine Studie mit folgender Zielsetzung unternommen :

1. Die Abschätzung der Vorräte durch einen biologischen Test für das Nachwachsen in der Dunkelheit und durch biochemische Dosierungen ;

2. Die Bestimmung des Gewichtes der Vorratsorgane der Pflanze.

Die Richtung der Nachwachsvariationen auf offenem Felde, welche die depressive Nachwirkung der Bewässerung ausdrückt, wird durch den biologischen Test wiedergegeben, während der Fruchtzuckerprozentsatz der verschiedenen Teile der Pflanze auf unregelmässige Weise schwankt. Das Nachwachsen auf dem Felde steigt in derselben Richtung wie das Gewicht der Stoppeln und der Bestockungsansätze und gemäss dem Gehalt an löslichem Stickstoff jeder dieser Fraktionen.

Das Nachwachsen in der Dunkelheit ist selbst unabhängig vom Fruchtzuckerprozentsatz ; es steht jedoch in Beziehung mit dem Gewicht der Stoppeln und der Bestockungsansätze und mit dem Gewicht des Fruchtzuckers der Stoppeln.

Man kann daher annehmen, dass die Nachwirkung der Bewässerung auf die im folgenden Jahre erzielte Produktion des ersten Zyklus, auf die durch diese Behandlung hervorgerufene Gewichtsabnahme der Stoppeln und der Bestockungsansätze, sowie auf die Gewichtsabnahme der Vorratszucker zurückzuführen ist.

Eine voraussagende Abschätzung der Nachwirkung kann auf einfache Weise durch die Bestimmung des Gewichtes der Vorratsorgane durchgeführt werden.

## РЕЗЮМЕ

*После-действие орошения на первый цикл двух кормовых злаковых (Dactylis glomerata L. и Festuca pratensis L.)*

МЭРИО СУСАННА.

Депрессивное после-действие орошения на продукцию первого цикла следующего года кормовых злаков, отмеченное в течении нескольких лет, об'ясняется некоторым истощением орошавшихся растений, давших слишком интенсивную продукцию, несовместимую с нормальным восстановлением запасов. Для проверки этой гипотезы были проведены следующие изучения в рамках экспериментального орошения (действие орошения на ежу, взаимное действие воды и азота на овсяницу) :

1) Определение запасов с помощью биологических тестов отроста в темноте и биохимических дозировок.

2) Определение веса органов запаса растений.

Изменения отроста в поле выражающие депрессивное после-действие орошения воспроизводятся биологическим тестом, в то время как содержание фруктозанов в разных частах растения колеблется беспорядочным образом. Но отрост в поле усиливается пропорционально увеличению веса стерни, площадей кущения, и веса фруктозанов в стерне.

Из этого заключается что после-действие орошения на продуктивность первого цикла следующего года злаковых, вызвано уменьшением веса стерни и площадей кущения от этого способа обработки, а также и падением веса запасных сахаров в растениях. Есть значит возможность прогнозировать и очень просто заранее оценить после-действие орошения с помощью определения веса органов запаса растений.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Baker H. K., 1957. Studies on the root development of herbage plants. III. The influence of cutting treatments on the root, stubble and herbage production of a perennial rye-grass Sward. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **12** (2), 197-208.

Bouchet R.-J., 1960. Evapotranspiration potentielle d'un couvert végétal : sa signification et sa mesure à partir de l'évaporation sous abri. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1231-1233.

Drake M., Colby W. G., Bredakis E., 1963. Yield of orchard grass as influenced by rates of nitrogen and harvest management. *Agron. J.*, **55**, 361-362.

Lefebvre J.-M., 1958. *Étude des variations des substances azotées au cours de la végétation de l'Orge.* Thèse Doct. Université de Paris.

Lefebvre J.-M., Joliet E., 1967. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du Dactyle. 1re partie. *Ann. agron.*, **18**, 529-543.

Lefebvre J.-M., Joliet E., 1968. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du Dactyle (Influence des fertilisations azotées). 2e partie. *Ann. agron.*, **19**, 379-396.

Lefebvre-Drouet E., 1969. Communication personnelle.

Lefebvre-Drouet E., 1970. Étude des variations de la composition minérale, protidique et glucidique des racines et des parties aériennes du Dactyle. (Influence de la fertilisation potassique). *Ann. agron.*, **21** (4), 385-402.

Lemoigne M., 1942. Les glucides des tubercules de pomme de terre. *Annale Fermentations*, **7**, 129-141.

MÉRIAUX S., PERREY C., 1961. Observations sur l'irrigation du Dactyle en sol de réserve hydrique moyenne. *Ann. agron.*, **12**, 81-86.

MÉRIAUX S., 1963. Données sur l'irrigation des prairies temporaires en zone sub-humide. *C. R. Acad. Agric.* 124-131.

MÉRIAUX S., 1964. Après quatre années d'irrigation de prairie temporaire en zone sub-humide. *VI^e Congrès International de Génie Rural*, Lausanne (Suisse).

SOMOGYI M., 1952. Notes on sugar determination. *J. Biol. Chem.*, **195**, 19-23.

VENGRIS J., HILL E. R., FIELD D. L., 1966. Clipping and Regrowth of Barnyard grass. *Crop Science*, **6**, 342-344.

WAITE R., BOYD J., 1953. The water-soluble carbohydrates of grasses. I. Changes occuring during the normal life-cycle. *J. Sci. Food Agric.*, **4**, 197-204.

WILLARD B., MCRARY L., MC SLATTERY, 1945. The colorimetric determination of fructosan in plant material. *J. Biol. Chem.*, **157**, 161-167.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (1), 113-125.

# ÉTUDE PAR ÉCHANGE ISOTOPIQUE DE LA TRANSFORMATION DANS UN SOL SANS VÉGÉTATION DE DIVERS ENGRAIS PHOSPHATÉS APRÈS 35 APPLICATIONS ANNUELLES

J.-C. FARDEAU et P. MARINI

avec la collaboration technique de Jocelyne JAPPÉ

*Département de Biologie, Service de Radio-Agronomie,*
*C. E. N. - Cadarache, B. P. nº 1, 13 - Saint-Paul-lez-Durance*
*Commissariat à l'Énergie atomique*

## RÉSUMÉ

L'analyse d'une expérience de fumure phosphatée annuelle poursuivie en conditions naturelles depuis 35 ans dans un limon du Bassin parisien a amené les conclusions suivantes :

1º En absence de culture, la quantité des formes organiques de phosphore du sol décroît d'environ 1 p. 100 par an.

2º Une migration importante des phosphates au-delà de la limite prévue de la couche labourée a été constatée pour tous les engrais appliqués ; le lessivage du phosphore ne rend compte que partiellement de cette migration.

3º Une fraction importante, plus de 50 p. 100 des phosphates solubles incorporés, n'a pas subi l'échange isotopique, ni par agitation prolongée, ni par de nombreuses alternances d'humectation et de dessiccation, ni par ébullition.

4º Le phosphore du phosphate d'ammonium s'est fixé davantage que celui du superphosphate en corrélation avec un fort abaissement du pH dans le cas du phosphate d'ammonium.

5º Le rapport du phosphore isotopiquement échangeable au phosphore total a été augmenté par le phosphate d'ammonium, le superphosphate ou les scories mais non par les phosphates naturels.

## INTRODUCTION

Une expérience au champ dont le but initial était d'étudier l'influence des principaux engrais simples sur la structure du sol, a été mise en place en 1928 à la Station centrale d'Agronomie de l'Institut national de la Recherche agronomique par BURGEVIN et HÉNIN, à l'initiative de DEMOLON. Ce dispositif expérimental, datant maintenant de 42 ans et dénommé « Expérience des 42 parcelles » est régi par un protocole immuable. Les engrais sont épandus à la main dans la deuxième

quinzaine de novembre et immédiatement enfouis. Les engrais phosphatés sont appliqués à la dose de 1 000 kg par ha et par an quelle que soit leur teneur en $P_2O_5$. Ce sont le superphosphate simple à 16 p. 100 de $P_2O_5$, les scories à 18 p. 100, le phosphate naturel à 28-30 p. 100 et le phosphate d'ammonium à 45 p. 100. Le sol de chaque parcelle (2 m × 2,5 m) maintenu sans végétation depuis 1928 est retourné à la bêche deux fois par an, au printemps dès l'apparition des mauvaises herbes, et à la fin de l'été. Les échantillons de sol de ces parcelles sont prélevés sur une hauteur de 25 cm une fois par an à l'automne. Ce sol de limon de pH 6,4 en 1928 et dont la constitution générale a été donnée par SIMON-SYLVESTRE (1964) a conservé depuis 1930 un pH de 6,1 dans la parcelle non traitée.

Le but du présent travail est d'étudier les variations quantitatives et qualitatives du phosphore du sol consécutives à ces divers apports. Pour chaque traitement, nous avons comparé l'accroissement du phosphore total et du phosphore minéral total à celui des formes échangeables, entre les années 1930 et 1965.

Un mode d'approche similaire a été effectué par divers auteurs dont BARBIER (1954, 1965), MATTINGLY (1958), MALEINA (1960), MOSKAL (1964), BLANCHET (1968), MURRMANN (1969). Les résultats obtenus par ces chercheurs l'ont été, soit avec des plantes par l'intermédiaire de valeurs A ou L, dont on sait qu'elles ne rendent pas systématiquement compte du phosphore réellement échangeable (FARDEAU, 1968 ; CONESA, 1969), soit par des échanges isotopiques relativement brefs. Nous nous sommes attachés ici à déterminer la quantité maximale d'ions-phosphate qui puisse participer à un échange isotopique poursuivi aussi longtemps que possible éventuellement jusqu'à sa limite (1). En outre, des extractions chimiques sélectives ont précisé les modifications des liaisons des ions phosphates.

Avant l'exposé des méthodes et des résultats, il est important de rappeler que cette expérimentation est réalisée sur sol nu et que chaque traitement correspond à une dose unique d'engrais, mais non de $P_2O_5$. Enfin, si les doses choisies semblaient massives en 1928 lors de la mise en place de ce champ d'expérience, elles correspondent en 1970 à certaines de celles utilisées dans les zones agricoles les plus intensives de France (ALTMAN, 1968) ou encore à celles mises directement en essai dans les pays en voie de développement (VELLY, 1958).

## MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

### 1. — *Échanges isotopiques*

L'objectif de ce travail consistait, on le rappelle, non pas à établir des cinétiques d'échanges, mais uniquement à définir pour chaque parcelle la quantité globale d'ions phosphate autodiffusibles : c'est pourquoi on a comparé les trois méthodes suivantes pour finalement adopter la plus rapide :

*a*) agitation permanente à 18°C durant 17 jours d'une suspension aqueuse de sol (FARDEAU, 1967) ;

*b*) alternances d'humectations et de dessiccations (MARINI, 1970) ;

*c*) ébullition durant 15 minutes d'un mélange sol/eau (1/10) selon le protocole suivant : 5 grammes de sol et 48 ml d'eau désionisée sont agités 24 heures dans une fiole cylindro-conique

(1) La limite de l'échange isotopique sera étudiée dans un mémoire ultérieur aux *Annales agronomiques*.

de 125 ml ; on ajoute ensuite 2 ml de solution radioactive contenant 1 µg/ml de phosphore entraîneur sous forme de phosphate monocalcique. Le tout est agité 10 minutes puis porté à ébullition douce sur plaque chauffante pendant le même temps. Après refroidissement, la suspension est centrifugée à 10 000 g pendant 10 minutes. Le culot de centrifugation est conservé pour le dosage du phosphore total de l'échantillon. La radioactivité spécifique du surnageant est déterminée par la mesure de la radioactivité $r$ de la solution et par le dosage de la quantité $q$ de ses ions phosphates selon FOGG et WILKINSON (1955) (colorimétrie du complexe phosphomolybdique après réduction par l'acide ascorbique). La radioactivité introduite étant R, la quantité Q de phosphore autodiffusible de l'échantillon est fournie par la relation :

$$\frac{Q}{R} = \frac{q}{r}$$

Les résultats obtenus par les 3 méthodes ne sont pas significativement différents, la précision sur les mesures étant de 6,5 p. 100 (MARINI, 1970) :

*P échangé en p.p.m. de terre*

| Traitements | Agitation | Alternances | Ébullition |
|---|---|---|---|
| Échantillon scories 1930.. | 99 | 98 | 105 |
| Échantillon scories 1965.. | 231 | 232 | 244 |

C'est pourquoi nous avons choisi cette dernière méthode car plus rapide et présentant peu de risques de perturbations liées aux développements de microorganismes.

### 2. — *Phosphore total des échantillons de sol*

L'extraction du phosphore total par la méthode de BLACK (1965) choisie pour sa simplicité malgré les objections soulevées par SYERS (1967), est réalisée sur les culots de centrifugation des échantillons utilisés pour l'expérience précédente. Elle consiste à porter à ébullition les 5 g de sol dans 30 ml d'acide perchlorique, à évaporer 20 ml de cet acide puis reprendre par 30 ml d'eau désionisée. Cette solution acide est portée à nouveau à ébullition 5 minutes pour hydrolyser en orthophosphate les pyrophosphates qui peuvent se former en milieu acide concentré bouillant. La solution est filtrée et on réalise simultanément sur des aliquotes un dosage colorimétrique par la méthode de Misson décrite par GUÉGEN (1959) et un comptage de $^{32}P$ pour s'assurer de l'extraction correcte du phosphore de l'échantillon.

### 3. — *Phosphore organique*

La technique de SAUNDERS (1955) a été retenue. Il s'agit uniquement d'une détermination par destruction de la matière organique. Elle consiste à évaluer la différence du phosphore minéral, après agitation 17 heures, en milieu sulfurique 0,2 N, de deux échantillons de sol, dont l'un a été préalablement calciné à 550°C pendant une heure.

### 4. — *Fractionnement des formes minérales type* CHANG *et* JACKSON (C. et J.)

La méthode C. et J. (1957) a été légèrement modifiée en s'inspirant de la technique des lessivages successifs rapides utilisée par BARBIER (1954). Après avoir placé 1 g de sol sur un filtre millipore (diamètre des pores : 0,22 µ), on percole successivement sous le vide d'une trompe à eau 50 ml de $NH_4Cl$ et 50 ml de $NH_4F$ 0,5 N ; les sols et le filtre sont alors transférés dans un tube à centrifuger (Servall rotor GSA) de 125 ml et vigoureusement agités manuellement une minute avec 50 ml de NaOH 0,1 N. Une centrifugation à 10 000 g de 5 minutes succède immédiatement. Ce surnageant est conservé et remplacé par 50 ml de $H_2SO$ 0,5N. Une agitation et une centrifugation semblables aux précédentes conduisent à l'extrait sulfurique. La matière organique de l'extraction alcaline est précipitée par $H_2SO_4$ concentré, séparée de son surnageant et miné-

ralisée par $HClO_4$. Quant aux dosages de phosphore sur ces 5 fractions, ils sont effectués par la méthode de DUVAL (1952) sans oublier l'addition d'acide borique dans l'extrait $NH_4F$ (DABIN, 1965). La modification des extractions successives C.-J. limite la redistribution de certaines formes minérales du phosphore en cours d'analyse.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### I. — *Variation des formes organiques et minérales entre 1930 et 1965*

Pour LARSEN (1967), seules sont autodiffusibles les formes minérales du phosphore du sol. C'est pourquoi il importe de comparer l'accroissement du phosphore échangeable à celui du phosphore minéral et non à celui du phosphore total. Dans le cas particulier de ces « 42 parcelles » sans végétation depuis 35 ans, la variation du phosphore minéral, $\Delta P_{mi}$, est toujours supérieure à celle du phosphore total $\Delta P_T$ (tabl. 1). La diminution nette de la proportion des formes organiques, $\Delta P_o$, se situe entre 20 et 25 p. 100 selon les parcelles et peut avoir, sous réserve d'informations complémentaires, deux causes :

TABLEAU I

*Variation de P total, P organique, et P minéral entre 1930 et 1965*
(P exprimé en p.p.m. de sol)

| Parcelles | | P total (1) | $\Delta P_T$ (2) | $P_{org.}$ (3) | $\Delta P_o$ (4) | $\Delta P_{mi}$ (5) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Phosphate d'ammonium n° 3 | 1930 | 565 | 935 | 211 | — 56 | 991 |
| | 1965 | 1 500 | | 155 | | |
| Superphosphate n° 27 | 1930 | 384 | 248 | 215 | — 65 | 313 |
| | 1965 | 632 | | 150 | | |
| Scories n° 35 | 1930 | 454 | 351 | 225 | — 47 | 398 |
| | 1965 | 805 | | 178 | | |
| Phosphate naturel n° 33 | 1930 | 410 | 680 | 223 | — 40 | 720 |
| | 1965 | 1 090 | | 183 | | |

— un lessivage,
— une minéralisation.

En choisissant l'hypothèse la plus probable de la minéralisation, et en admettant avec HÉNIN (1950) qu'en absence de restitution, la quantité de matières organiques restant dans le sol suit une loi du type $H = H_{oe}^{-\lambda t}$, les points empiriques (1930-1965) portés sur la figure 1 en coordonnées semi-logarithmiques donnent par extrapolation pour le temps de demi-rémanence du phosphore organique, respecti-

vement, 120, 105, 80 et 67 ans pour le phosphate naturel, les scories, le phosphate d'ammonium et le superphosphate. Il est intéressant de noter que ces valeurs sont très nettement supérieures à celles mesurées par SIMON-SYLVESTRE (1954) pour le carbone dans l'une des parcelles (superphosphate) et dans des parcelles voisines, et correspondent à une dégradation annuelle de l'ordre de 1 p. 100.

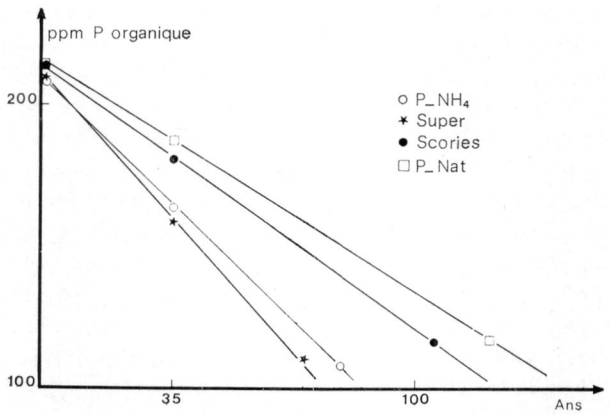



FIG. 1. — *Variation du P organique au cours du temps*

Pour compléter ces données, nous avons comparé l'enrichissement théorique des différentes parcelles à l'enrichissement observé (tabl. 2). L'accroissement théorique, calculé par BARBIER (1965) qui estime que l'engrais se distribue dans un équivalent de 3 000 tonnes de terre à l'hectare, est indiqué colonne 1. La différence entre cette valeur et l'enrichissement réel (colonne 2) pourrait s'expliquer par une

TABLEAU 2

*Accroissement du phosphore total comparé à la quantité appliquée*
(exprimé en P p.p.m. de sol)

| Parcelles | Enrichissement théorique (1) | Enrichissement réel (2) | « Migration » (3) | « Migration » % apport (4) | Concentration en mg P de la solution en équilibre (5)* | Concentration en mg P de la solution en équilibre (6)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Phosphate d'ammonium ..... | 1 987 | 935 | 1 052 | 53 | 6,32 | 8,20 |
| Superphosphate .. | 695 | 248 | 447 | 64,4 | 2,81 | 5,00 |
| Scories ..... | 780 | 351 | 429 | 55 | 2,47 | 4,64 |
| Phosphate naturel | 1 249 | 680 | 569 | 45,5 | 0,91 | 1,25 |

* BARBIER *et al.*, 1965. Rapport terre/eau = 1/20.
** FARDEAU. Rapport terre/eau = 1/10.

« migration » en profondeur d'une partie de l'apport, « migration » dont l'origine résiderait dans les fortes concentrations de la solution du sol, déjà indiquées par BARBIER *et al.* (1965) et vérifiées par nous (colonnes 5 et 6).

Les résultats du tableau 2 sont inattendus ; c'est d'ailleurs pourquoi ils ont été soigneusement vérifiés. D'une part, l'entraînement observé (colonne 4) est considérable puisqu'il dépasse en moyenne 50 p. 100, valeur plus élevée que ce qui est habituellement observé en sol cultivé. Mais surtout, la quantité entraînée, en valeur absolue, est plus grande pour le phosphate naturel que pour le superphosphate et les scories, bien que la concentration en $PO_4$ de la solution en équilibre (colonnes 5 et 6, soit beaucoup plus petite pour le premier, ce qui suggère que le *lessivage proprement dit n'est pas seul intervenu*, et laisse supposer un brassage de la couche labourée avec le proche sous-sol par des petits animaux ou par un approfondissement involontaire du labour ; c'est d'ailleurs ce qui paraît résulter du fait que la fraction entraînée est du même ordre de grandeur pour les 4 engrais. Cependant, étant donné que cette fraction est plus élevée pour les engrais solubles que pour le phosphate naturel, on peut conclure que l'entraînement est, pour une part, la conséquence du lessivage de phosphates dissous. Une étude de la répartition verticale du phosphore dans le sous-sol et de ses différentes formes, en comparant notamment le phosphate naturel avec les engrais solubles, permettrait sans doute de préciser cette question.

## II. — *Transformation des fractions minérales entre 1930 et 1965 en relation avec les formes apportées*

### 1. *Déterminations isotopiques.*

Les quantités et les accroissements du phosphore isotopiquement échangeable pour chaque traitement sont indiqués tableau 3 colonnes 1 et 2.

TABLEAU 3

*P en p.p.m. de sol*

| Parcelles | | $P_{ech.}$ (1) | $\Delta P_{ech.}$ (2) | $\Delta P_{mi.}$ (3) | $\frac{\Delta P_{ech.}}{\Delta P_{mi.}}$ (%) (4) | $\frac{P_{ech.}}{P_T}$ (%) (5) | pH eau (6) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Phosphate d'ammonium | 1930 | 190 | 386 | 991 | 39 | 30 | 5,6 |
| | 1965 | 576 | | | | 38 | 4,1 |
| Superphosphate | 1930 | 73 | 143 | 313 | 46 | 19 | 6 |
| | 1965 | 216 | | | | 35 | 5,6 |
| Scories | 1930 | 98 | 133 | 398 | 33 | 21 | 6,4 |
| | 1965 | 232 | | | | 29 | 7,2 |
| Phosphate naturel | 1930 | 98 | 159 | 720 | 22 | 24 | 6 |
| | 1965 | 258 | | | | 24 | 6 |

*a*) Ces résultats confirment que le moins soluble des engrais expérimentés, le phosphate naturel, a libéré des ions phosphoriques en quantité notable ; cependant, la valeur du rapport $\Delta P_{éch}/\Delta P_{mi}$ est minimale pour ce phosphate.

*b*) A noter que les scories comme le phosphate naturel ne renferment initialement que très peu de phosphate isotopiquement échangeable en phase solide (1 à 2 p. 100).

*c*) En aucun cas, la fraction restée ou devenue échangeable des phosphates incorporés n'atteint 50 p. 100.

2. *Déterminations chimiques.*

Pour compléter ces données isotopiques, le phosphore des différents échantillons a été fractionné selon une variante de la méthode CHANG et JACKSON (voir techniques). L'ensemble des résultats a été groupé dans le tableau 4 et représenté sur la figure 2.

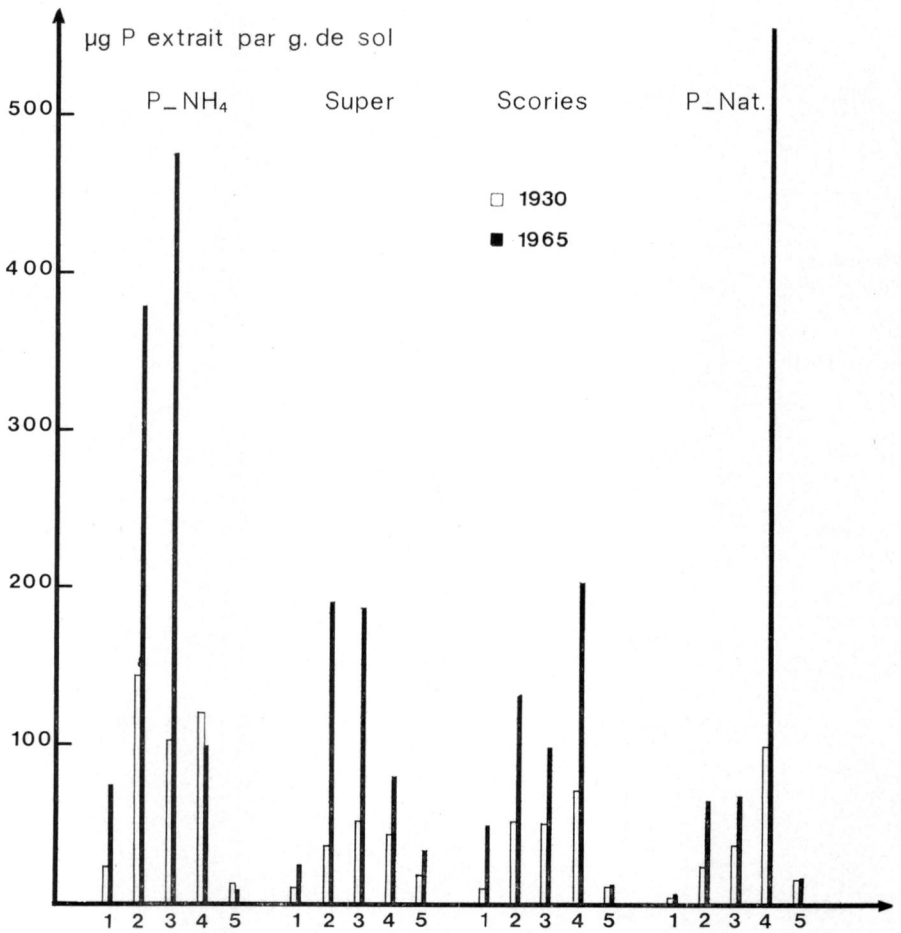



FIG. 2. — *Fractionnement de P par la méthode* CHANG *et* JACKSON
(les traitements 1, 2, 3, 4 et 5 sont indiqués au tabl. 4)

*a*) Par apport d'engrais solubles dans ce sol de limon, seules ont augmenté les trois premières fractions ; en particulier le superphosphate n'a pas provoqué de formation notable de phosphates calciques basiques (extraction 4). Cette remarque déjà établie par MOSKAL (1964) est confirmée dans cette expérience de longue durée.

*b*) En ce qui concerne les phosphates peu solubles, on trouve dans les échantillons de 1965, une part importante de phosphate lié au calcium (4). Pour mieux saisir l'évolution de ces formes, le même type d'extraction C. et J. a été effectué sur 10 mg de scories et de phosphate naturel, cette quantité correspondant sensiblement à celle ajoutée par gramme de sol au cours des 35 ans ; ces résultats sont notés au tableau 5.

Le fait majeur mettant en évidence la transformation de ces 2 types de phosphates réside dans l'accroissement des formes alcalino-solubles dans les échantillons de 1965, l'engrais n'en libérant pas sous cette forme.

TABLEAU 4

*Fractionnement de P par la méthode* CHANG *et* JACKSON
(P exprimé en p.p.m. de sol)

| Parcelles | | 1 $NH_4Cl$ | 2 $NH_4F$ | 3 NaOH (sans MO) | 4 $H_2SO_4$ | 5 MO de NaOH | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Phosphate d'ammonium | 1930 | 18 | 139 | 104 | 118 | 14 | 393 |
| | 1965 | 66 | 375 | 480 | 99 | 8 | 1 028 |
| Superphosphate | 1930 | 10 | 36 | 53 | 45 | 15 | 159 |
| | 1965 | 22 | 180 | 175 | 78 | 30 | 485 |
| Scories | 1930 | 11 | 51 | 50 | 72 | 13 | 197 |
| | 1965 | 49 | 136 | 96 | 204 | 15 | 500 |
| Phosphate naturel | 1930 | 3,5 | 20 | 39 | 97 | 15 | 174 |
| | 1965 | 5 | 60 | 67 | 555 | 17 | 704 |

TABLEAU 5

*Fractionnement de P des engrais en nature selon* CHANG *et* JACKSON
(P exprimé en µg pour 10 mg d'engrais)

| | $NH_4Cl$ | $NH_4F$ | NaOH | $H_2SO_4$ |
|---|---|---|---|---|
| Scories ..... | 44 | 16,2 | 1,8 | 385 |
| Phosphate naturel. | 25 | 26 | 1,8 | 960 |

*c*) Le tableau 6 compare l'accroissement des formes de P extraites selon CHANG et JACKSON à l'accroissement de P minéral.

De ces résultats, il ressort que le phosphate d'ammonium a évolué, en partie, vers des formes très peu mobiles, comme conséquence vraisemblablement de la forte acidification qu'il a provoquée en l'espèce. Il n'en est pas de même pour le superphosphate. Ces résultats sont en accord avec le fait que la fraction devenue non autodiffusible est moindre avec le superphosphate qu'avec le phosphate d'ammonium.

3. *Comparaison des déterminations isotopiques et chimiques.*

La majorité des auteurs localisent, dans les fractions 1, 2, 3, de C. et J., les formes échangeables du phosphore (TANDON, 1968). De fait, pour les phosphates les plus solubles comme pour les scories, l'accroissement de P extractible par les réactifs non acides de C. et J. dépasse largement l'accroissement de P isotopiquement échangeable (tabl. 7). C'est l'inverse pour le phosphate naturel : le phosphore échangeable n'est que partiellement extractible par les réactifs en question.

TABLEAU 6

*P exprimé en p.p.m. de sol*

| Parcelles | | P minéral | ΔP minéral | P minéral C. et J. (1 + 2 + 3 + 4) | ΔP minéral C. et J. | ΔP minéral non extrait C. et J. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Phosphate d'ammonium | 1930 | 454 | 991 | 379 | 633 | 358 |
| | 1965 | 1 345 | | 1 012 | | |
| Superphosphate | 1930 | 169 | 313 | 144 | 311 | 2 |
| | 1965 | 482 | | 455 | | |
| Scories | 1930 | 229 | 398 | 194 | 301 | 97 |
| | 1965 | 627 | | 487 | | |
| Phosphate naturel | 1930 | 187 | 720 | 159 | 528 | 192 |
| | 1965 | 907 | | 687 | | |

Cette anomalie suggère que le processus expérimental adopté a libéré du phosphate qui n'était pas échangeable dans l'échantillon de sol prélevé. Pour vérifier cette hypothèse, l'expérience a été reprise en réduisant à 15 minutes l'agitation préalable à l'introduction de $^{32}PO_4$. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 8.

Le même protocole expérimental réalisé pour les échantillons des parcelles scories n'a pas modifié les précédents résultats. L'anomalie constatée pour le phosphate naturel confirme que l'échange isotopique ne peut être correctement étudié

TABLEAU 7

*Comparaison de P échangeable à P extrait par les 3 premiers traitements* C. *et* J.
(P exprimé en p.p.m. de sol)

| Parcelles | Années | P minéral (somme des fractions 1 + 2 + 3 (C. et J.)) | $\Delta P_{C. \text{ et } J.}$ | $P_{ech.}$ | $\Delta P_{ech.}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Phosphate d'ammonium | 1930 | 261 | 660 | 190 | 386 |
| | 1965 | 921 | | 576 | |
| Superphosphate | 1930 | 99 | 280 | 73 | 143 |
| | 1965 | 379 | | 216 | |
| Scories | 1930 | 112 | 169 | 98 | 134 |
| | 1965 | 281 | | 232 | |
| Phosphate naturel | 1930 | 62,5 | 69,5 | 98 | 150 |
| | 1965 | 132 | | 258 | |

TABLEAU 8

*Influence du temps d'agitation préalable sur l'échange isotopique de P de la parcelle à phosphate naturel*
(P exprimé en p.p.m. de sol)

| Durée d'agitation | Années | $P_{ech.}$ | $P_{ech.}$ | P minéral (pour mémoire) | $\frac{P_{ech.}}{P_{min.}}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 minutes | 1930 | 58 | 64 | 720 | 8,9 |
| | 1965 | 122 | | | |
| 24 heures | 1930 | 98 | 160 | 720 | 22 |
| | 1965 | 258 | | | |

que dans un système en équilibre chimique, faute de quoi les diffusions proprement dites d'ions phosphate ou les variations de leurs liaisons se superposent à l'autodiffusion et perturbent le phénomène à étudier, notamment sa cinétique et éventuellement sa limite, comme c'était le cas en l'espèce.

## CONCLUSIONS

Nos résultats démontrent la possibilité d'un entraînement considérable du phosphore au-delà de la couche labourée, entraînement pouvant dépasser 50 p. 100 des phosphates incorporés après 35 ans, même en sol bien pourvu de minéraux adsorbants. Les données dont nous disposons ne nous ont pas permis de faire la part du lessivage proprement dit et du brassage de la terre superficielle avec le proche sous-sol par des petits animaux ou par un approfondissement involontaire et incontrôlé du labour. Néanmoins, nos résultats confirment que le lessivage des phosphates dissous est d'autant plus important que la concentration de la solution en équilibre est plus grande et que le drainage est plus intense.

Par ailleurs, une part importante des phosphates solubles incorporés et restés dans la couche labourée a été fixée sous forme non autodiffusible, jusqu'à 50 p. 100, bien que l'échange isotopique ait été poursuivi jusqu'à sa limite, aux erreurs de mesure près. En ce qui concerne un phosphate calcique naturel de Gafsa, 8,9 p. 100 seulement sont passés sous forme autodiffusible dans ce sol légèrement acide (pH initial = 6,0) en l'absence de culture ; une publication ultérieure confirmera que la mobilisation de ce phosphate est favorisée par l'action des racines.

*Reçu pour publication en décembre 1970.*

## REMERCIEMENTS

Ils vont à l'Institut national de la Recherche agronomique qui a bien voulu mettre à notre disposition des échantillons d'une valeur scientifique inestimable. Nous remercions également M. BARBIER et Mme BONIFACE pour les précieux conseils qu'ils nous ont fournis tout au long de cette étude.

## SUMMARY

### STUDY THROUGH ISOTOPIC EXCHANGE OF THE TRANSFORMATION IN A PLANTLESS SOIL OF VARIOUS PHOSPHATIC FERTILIZERS AFTER THIRTY-FIVE YEARLY FERTILIZING APPLICATIONS

Analyzing an experiment on yearly phosphatic fertilizing, carried out under natural conditions, over 35 years in a loam of the Paris Basin, has led to the following conclusions :

1. No cultivation being carried out, the amount of organic forms of the soil's phosphorus decreases approximately by 1 p. 100 yearly.

2. In all the fertilizers used, a substantial migration of the phosphate beyond the boundary expected for the ploughed layer occurred ; leaching of the phosphorus does not wholly account for such migrations.

3. Over 50 p. 100 of the soluble phosphates did not undergo isotopic exchange,whether through extended agitation, many alternating moist and dry periods, or boiling.

4. The phosphorus of the ammonium phosphate has been more fixed than that of the superphosphate, this correlating with a sharp decrease of the pH in the case of ammonium phosphate.

5. The ratio of the isotopically exchangeable phosphorus to the total phosphorus was increased by the ammonium phosphate, the superphosphate or the slag but not by the natural phosphates.

## ZUSAMMENFASSUNG

### UNTERSUCHUNG MITTELS ISOTOPISCHER AUSTAUSCHMETHODE DER UMWANDLUNG VERSCHIEDENER PHOSPHATDÜNGER IN EINEM UNBEWACHSENEN BODEN NACH FÜNF UND TREISSIG JÄHRIGER DÜNGUNG

Die Analyse eines jährlichen phosphatischen Düngungsversuches, der seit 35 Jahren unter natürlichen Bedingungen in einem Lehm des Pariser Beckens durchgeführt wurde, ergab die folgenden Schlussfolgerungen :

1° In einem unbewachsenen Boden nimmt die Menge der organischen Formen des Bodens phosphors um 1 p. 100 Jahr ab ;

2° Eine umfangreiche Wanderung der Phosphate jenseits der vorausgesehenen Grenze der gepflügten Bodenschicht wurde für die gesamten verwendeten Dünger festgestellt. Das Auslaugen des Phosphors gibt ein nur unvollkommenes Bild dieser Wanderung.

3° Ein wichtiger Bruchteil der eingearbeiteten löslichen Phosphaten, mehr als 50 p. 100 wurde von dem isotopischen Austausch nicht erfasst, weder durch verlängertes Rühren, noch durch zahlreiche Anfeuchtungs- und Entfeuchtungsbehandlungen, noch durch Verdampfen.

4° Der Phosphor des Ammoniumphosphates hat sich mehr fixiert als derjenige des Superphosphates im Zusammenhang mit einer starken Senkung der pH im Falle des Ammoniumphosphates.

5° Das Verhältnis des isotopisch auswechselbaren Phosphors zum gesamten Phosphor wurde durch das Ammoniumphosphat, des Superphosphat oder durch die Schlacken, nicht aber durch die echten Phosphate gesteigert.

## РЕЗЮМЕ

### Изучение с помощью метода изотопного обмена превращенний разных фосфорных удобрений в почве без растительности, после 35-ти лет годичных подкормок.

Ж. К. ФАРДО, П. МАРИНИ.

Анализ опыта фосфорных подкормок, вносившихся в природных условиях раз в год, в течении 35-ти лет в суглинок Парижского Бассейна, приводит к следующим заключениям :

1. В почве без растительности, количества органического фосфора уменьшаются на 1 % в год;

2. Отмечается сильная миграция фосфатов за предвиденные пределы пахотного слоя для всех применявшихся форм фосфорного удобрения; выщелачивание может дать только частичный отчет о размерах этой миграции.

3. Фракция, превышающая 50 % внесенных растворимых фосфатов, не вступает в изотопный обмен, ни при длительном встряхивании, или многочисленных чередованиях увлажнения и высыхания, ни при кипячении.

4. Фосфор фосфата аммония закрепляется лучше чем фосфор суперфосфата, в связи с сильным падением pH в случае применения фосфата аммония.

5. Соотношение изотопически-обменного фосфора к общему фосфору увеличивается в случае применения фосфата аммония, суперфосфата, или шлака, но не при внесении натуральных фосфатов.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ALTMANN C., 1968. Évolution de la consommation d'engrais minéraux et transformation des systèmes de production en agriculture. *Bull. Tech. Inf. Ministère Agriculture*, **231**, 707-717.

BARBIER G. *et al.*, 1954. Recherches au moyen d'isotopes sur les phénomènes d'autodiffusion dans le sol et sur l'alimentation des plantes. *Ann. agron.*, **6**, 923-955.

BARBIER G. *et al.*, 1965. Contribution à l'étude de l'influence du pH sur la mobilité des ions phosphoriques du sol. *Ann. agron.*, **16** (6), 603-622.

BLACK C. A., 1965. *Methods of Soil Analysis. Part* **2**, p. 1035-1049.

BLANCHET R., 1968. Problèmes actuels de la fumure phosphatée vus à travers quelques exploitations de la région toulousaine. *C. R. Acad. Agric.*, 1064-1072.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, **84**, 133-144.

CONESA A., 1969. Possibilités d'utilisation des polyphosphates par la plante. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **267**, 2063-2066.

DABIN B., 1965. Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. *Cahiers ORSTOM, Série Pédo.*, **111** (4), 335-366.

DUVAL L., 1962. Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais. *Ann. agron.*, **13** (5), 469-482.

FARDEAU J. C., MARINI P., 1967. Sur la détermination des cinétiques d'échange isotopique des ions phosphate d'un sol. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **267**, série D, 324-327.

FARDEAU J. C., 1968. Utilisation de la phytine par les plantes. *Isotopes and radiations in soil organic matter studies* , 555-565.

FOGG D. N., WILKINSON, 1958. The colorimetric determination of phosphorus. *The Analyst*, **83**, 406-424.

GUÉGUEN L., 1959. Étude de la composition minérale de quelques espèces fourragères. *Ann. Zootech.*, 245.

HÉNIN S., 1960. *Le profil cultural.* Société des Ingénieurs Agricoles, Paris 6e, p. 273-285.

LARSEN S., 1967. Soil phosphorus. *Adv. Agron.*, **19**, 151-210.

MALEINA A. A., 1960. Effect of systematic fertilizers and liming on the supply of available P in soil. *Potchvovedenie*, 71-74.

MARINI P., 1970. Évolution du superphosphate anciennement enterré : mesure par échange isotopique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **270**, 3 239-3242.

MATTINGLY E. G., 1958. Phosphate residues in Rothamsted soils. *Rothamsted exper. Stn Rep. for* 1957, 61.

MOSKAL S., 1964. What happens to the phosphorus from superphosphate in the soil not absorbed by plants as established on the basis of field experiments carried on for many years. *Roczn. Glebznawcze*, **14**, 81-86.

MURRMANN R. P. *et al.*, 1969. Relative signifiance of labile and crystalline phosphates in soils. *Soil Sci.*, **107**, 4, 249-253.

OBERLANDER R. H. E. The fertilizing effect of hyperphos on Austrian soils. *Bodenkultur*, **18**, 287-292.

SAUNDERS W. M. H., 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. *J. Soil Sci.*, **6**, 2, 254-267.

SIMON-SYLVESTRE G., 1964. Évolution comparée du soufre, de l'azote et du carbone pendant 30 ans dans un sol maintenu sans végétation. *V. Simposio Internationale di Agrochimica su lo Zolfo in agricoltura.* Palerme, 16-21 mars 1964, p. 163-169.

SYERS J. K., 1967. The signifiance of apatite inclusions in soil Phosphorus Studies. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31** (6), 752-756.

TANDON H. L. S., KURTZ L. T., 1968. Isotopic exchange characteristics of Aluminium and Iron bound fractions of soil phosphorus. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (6), 677-802.

TARDIEUX-ROCHE A., 1966. *Contribution à l'étude des interactions entre phosphates naturels et microflore du sol.* Thèse Doc. Sci. Nat. nº 941, Fac. Sciences, Paris.

VELLY J., 1968. Résultats de tests culturaux sur collines dans la province de Tananarive. *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux*, (19-25 nov. 1967). (Éditeur I.R.A.T., 110, rue de l'Université, Paris 7e), 1729-1744.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (1), 127-147.

# LE DOSAGE DU MOLYBDÈNE DANS LES VÉGÉTAUX. EXAMEN DES DIVERS PROCÉDÉS DE DÉTERMINATION. MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE COLORIMÉTRIQUE AU THIOCYANATE

L. DUVAL
avec la collaboration technique de Paulette Le Goff

*Station d'Agronomie, I. N. R. A.*
*29 S- Quimper*

## RÉSUMÉ

Le molybdène étant, en général, peu abondant dans les plantes, les méthodes physiques sont difficilement applicables à sa détermination. En revanche, les méthodes chimiques, qui ont une plus grande sensibilité, permettent d'effectuer le dosage du molybdène des tissus végétaux avec une bonne précision ; c'est le cas, en particulier, de la méthode colorimétrique au thiocyanate décrite dans le présent article.

La technique au thiocyanate proposée est caractérisée par la substitution du thiocyanate au chlorure stanneux pour la réduction de Mo (VI) en Mo (V). Une étude de l'influence des différents facteurs nous a permis d'établir l'existence d'une aire de stabilité du complexe molybdique des ions thiocyanates ; grâce à la connaissance de cette propriété, il nous a été possible de définir, par des procédés rationnels, les conditions optimales de détermination du molybdène des végétaux.

La préparation de l'échantillon à doser comporte la calcination de la matière végétale à une température comprise entre 600 et 700° C et la mise en solution du molybdène par l'acide chlorhydrique. Après sa formation, le complexe molybdique est extrait par l'acétate de butyle. La méthode décrite est sensible, reproductible, simple et relativement rapide.

## INTRODUCTION

La présence du molybdène dans les végétaux a été mise en évidence, au début du siècle, par Demarçay (1900). Plus tard, Bortels (1930) montra que cet élément joue le rôle de catalyseur dans la fixation de l'azote atmosphérique par l'*Azotobacter chroococcum*. Ensuite, Steinberg (1936) établit que le molybdène est nécessaire à

la croissance et à la sporulation de l'*Aspergillus niger* ; il remarqua, en outre, que ce métal est indispensable à la réduction enzymatique des nitrates (STEINBERG, 1937). Chez les végétaux supérieurs, la nécessité du molybdène fut démontrée par ARNON et STOUT (1939), dans des essais réalisés sur des tomates.

Des phénomènes de carence en molybdène ont ensuite été décrits et étudiés sur diverses cultures, dans les différentes parties du monde (CHAPMAN, 1966). En France, ils ont été observés sur des choux-fleurs (LAGAUDE, 1959) et sur des melons (HUGUET, 1961 ; BESSON, 1962 ; RUTTEN, 1964).

A la suite des travaux établissant la nécessité du molybdène dans l'alimentation des plantes, des méthodes analytiques, utilisées en sidérurgie, ont été adaptées au dosage du molybdène des végétaux. Nous examinerons, dans une première partie, les caractéristiques des différentes méthodes proposées. La deuxième partie sera consacrée à l'étude et à la description d'une méthode colorimétrique au thiocyanate utilisable pour la détermination du molybdène des plantes.

## I. — LES PROCÉDÉS DE DOSAGE DU MOLYBDÈNE DES VÉGÉTAUX ; MODE OPÉRATOIRE ET LIMITE DE SENSIBILITÉ DES MÉTHODES

Les méthodes de détermination du molybdène des végétaux sont, en général, des adaptations de techniques analytiques mises au point pour le dosage du molybdène en sidérurgie. Mais si, dans les aciers, la teneur en molybdène varie de 250 à 12 000 p.p.m. de Mo, dans la majorité des végétaux, elle est comprise entre 0,2 et 1 p.p.m. de Mo (ROBINSON et EDGINGTON, 1954) ; les valeurs maximales trouvées dans les plantes se développant sur des sols exceptionnellement riches en molybdène, sont de l'ordre de 500 p.p.m. (RUDA, 1961). Les végétaux carencés contiennent moins de 0,10 p.p.m. de Mo (CHAPMAN, 1966). D'après CUNNINGHAM (1955), les végétaux sont toxiques pour les ruminants quand la teneur en molybdène est supérieure à 3 p.p.m. de Mo avec les plantes pauvres en cuivre et à 10 p.p.m. avec les plantes normalement pourvues en cuivre.

Le dosage du molybdène des végétaux est, le plus souvent, réalisé au moyen de méthodes colorimétriques ; mais il est proposé aussi des techniques reposant sur des procédés physiques : polarographie, spectrographie d'émission, fluorescence X, spectrophotométrie d'absorption atomique, activation neutronique. Nous considérons, pour chaque procédé analytique, d'une part, les manipulations nécessaires à la préparation de l'échantillon, et, d'autre part, la limite de sensibilité de la méthode.

### 1. — *Colorimétrie*

Le molybdène a la propriété de former des complexes colorés ; la coloration est jaune-orangé avec les thiocyanates et elle est vert foncé avec le dithiol.

La méthode, la plus ancienne et la plus souvent utilisée, est basée sur la réaction étudiée, en 1863, par BRAUN ; celle-ci est caractérisée par le développement d'une coloration jaune-orangé due à la formation d'un complexe du molybdène pentavalent et des ions thiocyanates (DICK et BINGLEY, 1947). La sensibilité de la méthode est

variable suivant les modes opératoires et les réactifs utilisés pour la réduction du molybdène hexavalent ; à titre d'exemple, nous donnons ci-dessous quelques valeurs du coefficient d'extinction moléculaire (ε) :

— 8 200 (ADAMIEC, 1966),
— 12 200 (ADAMIEC, 1966),
— 15 300 (CHARLOT, 1966),
— 16 400 (WILSON et MCFARLAND, 1964),
— 18 700 (CROUTHAMEL et JOHNSON, 1954),
— 18 900 (BOULIN et JAUDON, 1965),
— 19 500 (CROUTHAMEL et JOHNSON, 1954).

La technique que nous avons mise au point est une adaptation de la méthode BOULIN et JAUDON (1965) ; elle est caractérisée par la substitution du thiocyanate au chlorure stanneux pour la réduction du molybdène hexavalent.

HAMENCE (1940) constata que le dithiol, ou méthyl-4 dimercapto-1,2 benzène, forme avec le molybdène hexavalent un complexe vert foncé. Ce réactif a été appliqué au dosage du molybdène des végétaux par PIPER et BECKWITH (1948) ; mais, comme le font remarquer ces auteurs, une séparation préliminaire du molybdène est nécessaire car le dithiol forme des précipités colorés avec un grand nombre d'éléments (PIPER et BECKWITH, 1948). Une technique est aussi décrite par BERTRAND (1960). La valeur du coefficient d'extinction moléculaire est de 17 500 (CHARLOT, 1966).

Parmi les autres réactifs proposés pour le dosage du molybdène des végétaux, citons le 2-amino-4-chlorobenzènethiol qui forme avec le molybdène hexavalent un complexe de coloration verte (SSEKAALO et JOHNSON, 1969).

La sensibilité des méthodes colorimétriques permet de déterminer jusqu'à 0,01 p.p.m. de Mo dans les végétaux ; les manipulations exigées par le dosage sont les suivantes :

— minéralisation de l'échantillon de plante par voie sèche ou par voie humide (Mi),
— mise en solution du molybdène par un acide (Ms),
— formation du complexe molybdique (Fc),
— extraction du complexe par un solvant (Ec),
— détermination colorimétrique du molybdène ($D_{Mo}$).

La méthode au thiocyanate, que nous décrivons dans cet article, est un peu plus sensible que la méthode au dithiol ($\varepsilon_T = 18\,900$ ; $\varepsilon_D = 17\,500$) ; elle est aussi plus simple et plus rapide puisque la méthode au dithiol nécessite de nombreuses opérations pour l'élimination des ions interférents (PIPER et BECKWITH, 1948 ; BERTRAND, 1960). La méthode SSEKAALO et JOHNSON (1969) comporte aussi beaucoup de manipulations car, entre la minéralisation de l'échantillon et la formation du complexe avec le 2-amino-4-chlorobenzènethiol, le molybdène est isolé par le cupferron, ce qui entraîne des opérations supplémentaires : l'extraction puis la minéralisation du complexe Mo-cupferron et une deuxième mise en solution du molybdène.

### 2. — *Polarographie*

Le dosage du molybdène des végétaux par polarographie a été proposé par NICHOLS et ROGERS (1944), JONES (1954), NANGNIOT (1964). Ces méthodes sont

caractérisées par la séparation préalable du molybdène au moyen de l'α-benzoïne-oxime ; le mode opératoire est le suivant :

— minéralisation du végétal par voie sèche ou par voie humide (Mi),
— mise en solution du molybdène présent dans le résidu d'attaque (Ms),
— formation d'un complexe du molybdène et de l'α-benzoïne-oxime (Fc),
— extraction du complexe Mo-α-benzoïne-oxime (Ec),
— minéralisation du complexe (Mi),
— mise en solution du molybdène (Ms),
— détermination polarographique du molybdène ($D_{Mo}$).

Ce procédé analytique est sensible puisqu'il permet aussi de déterminer jusqu'à 0,01 p.p.m. de Mo ; il nécessite, cependant, deux minéralisations et deux mises en solutions.

### 3. — *Spectrographie d'émission*

Elle présente l'avantage de pouvoir déterminer, sur un faible poids de plante, plusieurs éléments en une seule opération.

Milbourn (1937) opère sur des échantillons de plante réduite en poudre ; il situe la limite de détection du molybdène vers 5 p.p.m. de Mo.

De nombreux auteurs calcinent les végétaux avant les déterminations spectrographiques, mais, comme le souligne Cottenie (1962) : « la sensibilité atteinte reste toutefois encore insuffisante pour permettre la détermination directe des teneurs très basses des éléments Mo et Co souvent rencontrées ». En effet, malgré la calcination, les méthodes spectrographiques ne permettent pas de déterminer moins de 5 p.p.m. de Mo (Nichols et Rogers, 1944), 3 p.p.m. de Mo (Connor et Bass, 1962).

Aussi, est-il nécessaire de concentrer le molybdène dans l'échantillon soumis à l'analyse spectrographique ; mais cette opération exige de nombreuses manipulations ; ainsi, dans la méthode de Mitchell et Scott (1947), l'échantillon est traité de la façon suivante :

— calcination du végétal et fusion alcaline des cendres (Mi),
— mise en solution du molybdène (Ms),
— précipitation du molybdène par l'hydroxyquinoléine, l'acide tannique et la thiolanide (Fc),
— calcination du précipité (Mi),
— détermination colorimétrique du fer ($D_{Fe}$),
— analyse spectrographique sur l'échantillon préparé avec le résidu de calcination du précipité ($D_{Mo}$).

Avec une telle concentration chimique, il est possible de déterminer jusqu'à 0,05 p.p.m. de Mo (Pinta, 1955).

### 4. — *Fluorescence X*

Comme la spectrographie, la fluorescence X permet d'effectuer simultanément le dosage de plusieurs éléments sur une faible quantité de matière végétale.

Brandt et Lazar (1958) opèrent sur des échantillons de plantes séchées et broyées, sans calcination ou concentration chimique préalable. Ils fixent la limite de détection du molybdène à 10 p.p.m. de Mo.

En opérant sur des cendres, LAZAR et BEESON (1958) peuvent déterminer le molybdène des plantes dont la teneur est supérieure à 2 p.p.m. de Mo.

Il apparaît que, pour de nombreux végétaux, le dosage du molybdène est impossible par ce procédé analytique. Aussi, GUENNELON et SOUTY (1964) prévoient-ils d'isoler le molybdène et de le concentrer dans l'échantillon soumis à l'analyse ; entre la mise en solution du molybdène et sa détermination par fluorescence X, ils proposent les manipulations suivantes :

— précipitation du molybdène par l'oxime,
— séparation du complexe Mo-oxime,
— formation d'un complexe du molybdène avec l'α-benzoïne-oxime,
— déposition du complexe sur un support cellulosique.

### 5. — *Spectrophotométrie d'absorption atomique*

Cette technique d'analyse est assez récente puisqu'elle date de 1955 (THILLIEZ, 1964). Au cours des dernières années, elle a reçu de nombreuses applications.

Selon THILLIEZ (1964), le molybdène fait partie des éléments dont la concentration, dans la solution soumise à l'analyse, doit être comprise entre 1 et 5 mg/l, sinon ils ne sont pas décelables. Ceci explique que la spectrophotométrie d'absorption atomique a été peu appliquée au dosage du molybdène des végétaux ; en effet, dans les meilleures conditions actuelles, il ne serait guère possible de déceler le molybdène dans des plantes ayant une teneur inférieure à 1 p.p.m. de Mo.

HOOVER et DUREN (1967) dosent le molybdène des engrais par une technique d'absorption atomique et ils considèrent que « ce procédé donne des résultats valables pour des teneurs aussi faibles que 2,5 p.p.m. de Mo ». Dans la méthode décrite par ces auteurs, les échantillons, soumis à l'analyse photométrique d'absorption atomique, doivent être préparés de la même façon que pour les déterminations colorimétriques. Le mode opératoire est, en effet, le suivant :

— attaque par voie humide et voie sèche de l'échantillon d'engrais (Mi),
— mise en solution du molybdène (Ms),
— formation d'un complexe avec le thiocyanate (Fc),
— extraction du complexe par un solvant organique (Ec),
— détermination par spectrophotométrie d'absorption atomique du molybdène contenu dans la phase organique ($D_{Mo}$).

### 6. — *Activation neutronique*

La méthode repose sur la formation d'un isotope radioactif du molybdène : $^{99}_{42}$Mo ; celui-ci est obtenu en irradiant l'isotope naturel $^{96}_{42}$Mo par un flux de neutrons. Le molybdène radioactif $^{99}_{42}$Mo se désintègre d'abord en technicium métastable $^{99}_{43}{}^{m}$Tc puis en technicium $^{99}_{43}$Tc et enfin en ruthénium $^{99}_{44}$Ru (RODERBOURG, MASSAUX et KIRCHMANN, 1963) :

$$^{96}_{42}\mathrm{Mo} + 3\,^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{99}_{42}\mathrm{Mo}$$
$$^{99}_{42}\mathrm{Mo} \longrightarrow {}^{99}_{43}\mathrm{m'Tc} + -\beta$$
$$^{99}_{43}\mathrm{m'Tc} \longrightarrow {}^{99}_{43}\mathrm{Tc}$$
$$^{99}_{43}\mathrm{Tc} \longrightarrow {}^{96}_{44}\mathrm{Ru} + -\beta$$

L'activation neutronique a été appliquée au dosage du molybdène des plantes par RODERBOURG, MASSAUX et KIRCHMANN (1963), LIVINGSTON et SMITH (1967). Après irradiation de l'échantillon végétal, ces auteurs procèdent à une séparation chimique du molybdène afin d'éliminer les impuretés activées qui, par leur rayonnement, perturberaient la mesure de l'activité du molybdène.

La séparation chimique est basée sur une minéralisation suivie d'une précipitation du molybdène par l'α-benzoïne-oxime ; le complexe Mo-α-benzoïne-oxime est redissous et extrait par l'acétate isoamylique en présence de thiocyanate de potassium. En opérant ainsi, la limite de détection est située vers 0,2 p.p.m. de Mo (RODERBOURG, MASSAUX et KIRCHMANN, 1963).

LIVINGSTON et SMITH (1967) obtiennent une limite de détection de l'ordre de 0,02 p.p.m. de Mo, mais la séparation chimique comporte de nombreuses manipulations ; le mode opératoire est, en effet, le suivant :

— irradiation du végétal (Ir),
— minéralisation par voie humide (Mi),
— mise en solution du molybdène (Ms),
— formation d'un complexe du molybdène et du cupferron (Fc),
— extraction du complexe Mo-cupferron par le chloroforme (Ec),
— minéralisation par voie humide du complexe Mo-cupferron (Mi),
— mise en solution du molybdène (Ms),
— formation d'un complexe du molybdène et du chlorure de tétraphénylarsonium (Fc),
— extraction du complexe (Ec),
— détermination de la radioactivité ($D_{Mo}$).

### 7. — *Discussion*

L'examen des caractéristiques des différentes méthodes d'analyse du molybdène, exposées ci-dessus et résumées dans le tableau 1, permet d'orienter le choix d'une technique de dosage en fonction du but poursuivi.

Certaines méthodes, telles que la spectrographie d'émission et la fluorescence X sont rapides car l'échantillon n'a pas à subir une longue préparation avant les mesures ; elles présentent, en outre, l'avantage de pouvoir déterminer simultanément plusieurs éléments. Mais elles ne sont pas assez sensibles puisque leur limite de détection n'est pas inférieure à 2 ou 3 p.p.m. de Mo. En conséquence, dans la majorité des végétaux, la teneur en molybdène restera indéterminée. Cependant, ces méthodes pourront être appliquées soit à l'identification des plantes susceptibles d'être toxiques pour les ruminants, soit aux études relatives à l'enrichissement des plantes en molybdène.

D'autres méthodes sont plus sensibles mais elles exigent une séparation préalable du molybdène et, de ce fait, elles sont moins rapides. Toutefois leur sensibilité permet de déterminer le molybdène dans tous les végétaux, même dans les plantes carencées en cet oligo-élément ; c'est le cas de la colorimétrie, de la polarographie, de la spectrographie d'émission, de l'activation neutronique ; cependant, dans les deux dernières méthodes citées, l'abaissement du seuil de détection n'est obtenu qu'après une séparation chimique très poussée.

Malgré la séparation du molybdène, une méthode peut ne pas être applicable à beaucoup de végétaux ; c'est le cas de la spectrophotométrie d'absorption atomique ;

sa sensibilité est, en effet, environ 100 fois plus faible que celle de la colorimétrie ou de la polarographie, bien que les échantillons de plantes soient soumis à une préparation identique.

Il apparaît que la colorimétrie et la polarographie sont les méthodes les plus sensibles ; et, de ces deux techniques, la plus rapide est la colorimétrie au thiocyanate

TABLEAU I

*Teneur en molybdène des végétaux.*
*Caractéristiques des méthodes de dosage du molybdène :*
*mode opératoire et limite de détection*

*Teneur en molybdène des végétaux*

| | |
|---|---|
| Végétaux carencés | $<$ 0,10 p.p.m. de Mo |
| Majorité des végétaux | 0,20 à 1 p.p.m. de Mo |
| Végétaux toxiques pour les ruminants | $>$ 3 p.p.m. de Mo pour de faibles teneurs en cuivre<br>$>$ 10 p.p.m. de Mo pour des teneurs normales en cuivre |
| Teneurs naturelles maximales | $\simeq$ 500 p.p.m. de Mo |

| *Méthode d'analyse* | *Mode opératoire*<br>Mi = minéralisation<br>Ms = mise en solution de Mo<br>Fc = formation d'un complexe de Mo<br>Ec = extraction du complexe de Mo<br>$D_{Mo}$ = détermination de Mo<br>$D_{Fe}$ = détermination de Fe<br>Ir = irradiation de Mo | *Limite de détection* |
|---|---|---|
| Colorimétrie | Mi + Ms + Fc + Ec + $D_{Mo}$ | 0,01 p.p.m. de Mo |
| Polarographie | Mi + Ms + Fc + Ec + Mi + Ms + $D_{Mo}$ | 0,01 — — |
| Spectrographie d'émission | Détermination sur la poudre végétale ($D_{Mo}$) | 5 — — |
| | Détermination sur les cendres (Mi + $D_{Mo}$) | 3 — — |
| | Mi + Ms + Fc + Mi + $D_{Fe}$ + $D_{Mo}$ | 0,05 — — |
| Fluorescence X | Détermination sur la poudre végétale ($D_{Mo}$) | 10 — — |
| | Détermination sur les cendres (Mi + $D_{Mo}$) | 2 — — |
| Spectrophotométrie d'absorption atomique | Mi + Ms + Fc + Ec + $D_{Mo}$ | 1 — — |
| Activation neutronique | Ir + Mi + Ms + Fc + Ec + Mi + Ms + Fc + Ec + $D_{Mo}$ | 0,02 — — |

telle que nous la décrivons ; car, avec d'autres réactifs colorimétriques : dithiol ou 2-amino-4-chlorobenzènethiol, l'élimination des ions interférents exige des manipulations supplémentaires.

Les remarques précédentes, concernant les procédés d'analyse et leur application au dosage du molybdène, sont, d'une façon générale, applicables au dosage du cobalt. Pour la détermination de cet oligo-élément, la colorimétrie est aussi la technique la plus sensible; elle permet, en effet, de déterminer jusqu'à 0,02 p.p.m. de Co dans les végétaux (MORÉ, 1969).

## II. — DOSAGE DU MOLYBDÈNE DES VÉGÉTAUX PAR UNE MÉTHODE AU THIOCYANATE MODIFIÉE

### A. — Étude des conditions de validité de la méthode au thiocyanate

#### 1. — *Principe de la méthode*

Dans un milieu acide, la réduction du molybdène hexavalent, en présence de thiocyanate, provoque la formation d'un complexe de coloration jaune-orangé. D'après l'étude de Kolling (1965), il s'agit d'un complexe du molybdène pentavalent et des ions thiocyanates : l'oxypentathiocyanatomolybdate (V) dont la formule est $[MoO(SCN)^5]^{--}$.

La réaction peut s'écrire schématiquement de la façon suivante :

$$\text{Mo (VI)} + \text{réducteur} + 5\ SCN^- \xrightarrow{\text{en milieu acide}} [MoO\ (SCN)_5]^{--}$$

oxypentathiocyanatomolybdate (V)

Examinons l'influence de chacun des composés chimiques intervenant dans la réaction de formation du complexe.

#### 2. — *Influence de la nature du réducteur*

a) *Chlorure stanneux.*

C'est le réducteur le plus souvent utilisé mais il présente l'inconvénient de réduire une partie du molybdène à l'état trivalent. Selon Crouthamel et Johnson (1954), la réaction s'effectuerait en 2 temps :

$$\text{Mo (VI)} + \text{Sn (II)} \longrightarrow \text{Mo (IV)} + \text{Sn (IV)}$$
$$2\ \text{Mo (IV)} \longrightarrow \text{Mo (V)} + \text{Mo (III)}.$$

Dans un milieu contenant des ions molybdiques trivalents et pentavalents, et des ions thiocyanates, la formation du composé $[MoO(SCN)_5]_3Mo_2$ paraît probable. Or, d'après Prieto-Bouza (1960), seule la partie anionique $[MoO(SCN)_5]^{--}$ est chromogène ; par conséquent, l'intensité de la coloration est, à égalité de concentration molybdique, d'autant plus faible que la proportion de Mo (III) est importante. Ceci expliquerait, d'une part, les valeurs peu élevées du coefficient d'extinction moléculaire de certaines méthodes (paragraphe $I_1$), et, d'autre part, les variations de ces valeurs suivant la concentration en chlorure stanneux adoptée. D'ailleurs, Wilson et McFarland (1964) n'obtiennent une valeur élevée du coefficient d'extinction moléculaire ($\varepsilon = 16\ 400$) qu'en oxydant l'excès d'ions stanneux par l'acide perchlorique avant la formation du complexe.

b) *Thiocyanate.*

Pour le dosage du molybdène en sidérurgie, Boulin et Jaudon (1965) réduisent Mo (VI) en Mo (V), non plus par le chlorure stanneux, mais par le thiocyanate mis en excès. En jouant le rôle, d'une part, de réducteur de Mo (VI) en Mo (V), et, d'autre

part, de complexant de Mo (V), le thiocyanate évite la formation de Mo (III) et permet ainsi d'obtenir une meilleure sensibilité. La valeur du coefficient d'extinction moléculaire est une des plus élevées (paragraphe $I_1$) ; elle atteint, en effet, 18 900 à 468 nm (BOULIN et JAUDON, 1965).

Pour le dosage du molybdène des végétaux, nous avons retenu le mode de réduction de la méthode BOULIN et JAUDON (1965) dont les caractéristiques sont les suivantes :

— réduction de Fe (III) en Fe (II) par l'acide ascorbique en présence de cuivre,
— réduction de Mo (VI) en Mo (V) par les ions thiocyanates,
— formation du complexe de Mo (V) et des ions thiocyanates,
— extraction du complexe par l'acétate de butyle,
— lavage de la phase organique par une solution de chlorure stanneux afin d'éliminer les dernières traces de fer.

Mais les teneurs en molybdène des plantes (tabl. 1) étant beaucoup plus faibles que celles des aciers (250 à 12 000 p.p.m. Mo), il nous a fallu modifier la concentration de certains réactifs.

### 3. — *Influence de la concentration en thiocyanate*

D'après BOULIN et JAUDON (1965), la concentration en $SCN^-$ doit être comprise entre 0,4 et 0,5 M ; mais l'expérience montre que cet optimum, établi avec une solution contenant 4 mg/l de Mo, n'a pas une valeur générale ; il varie, en effet, avec la concentration molybdique de la phase aqueuse. Par exemple, lorsque la solution contient 0,04 mg/l de Mo, concentration courante dans le dosage du molybdène des végétaux, l'optimum de concentration en thiocyanate est compris, comme l'indique

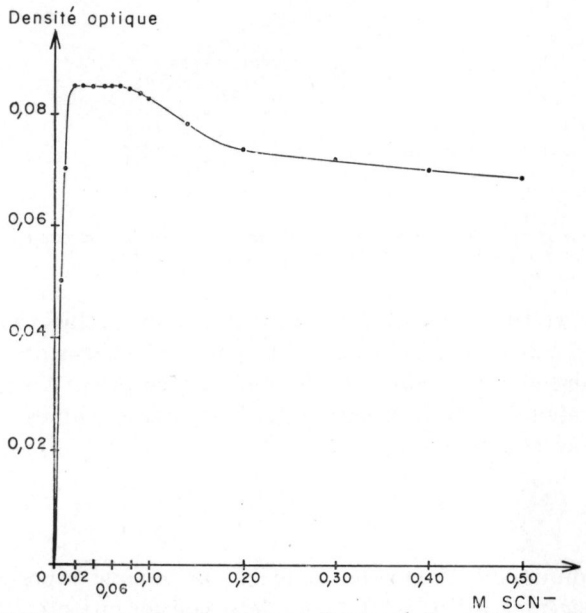



FIG. 1. — *Variation de la densité optique en fonction de la concentration en thiocyanate dans un milieu contenant 0,04 mg/l de Mo*

la figure 1, entre 0,02 et 0,07 M. L'examen de cette figure montre qu'à 0,4 et 0,5 M, la sensibilité est inférieure à celle du segment d'invariabilité de la densité optique ; en outre, la coloration du complexe est instable, en effet, son intensité croît constamment avec le temps ; alors qu'à l'optimum de concentration en thiocyanate, elle est stable pendant environ 10 jours.

### 4. — *Influence de la concentration en molybdène*

Nous avons déterminé l'optimum de concentration en thiocyanate pour diverses concentrations en molybdène ; les courbes obtenues sont décrites dans le trièdre de coordonnées rectangulaires $Oxyz$ (fig. 2), les axes $Ox$, $Oy$, et $Oz$ représentent respec-

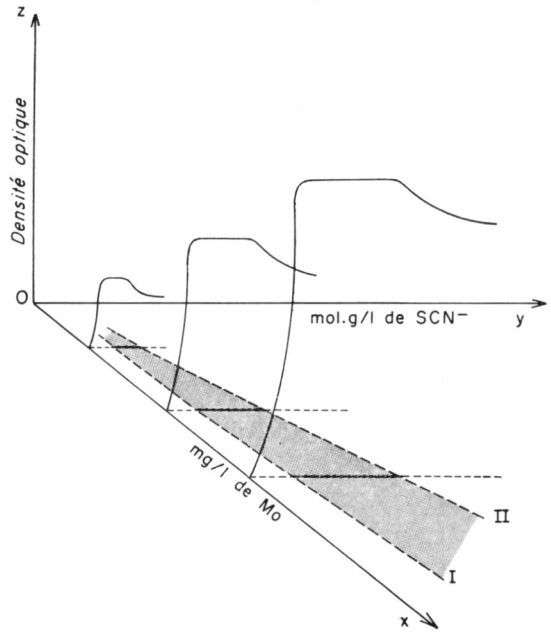



FIG. 2. — *Variation de la densité optique en fonction de la concentration en thiocyanate pour diverses concentrations en molybdène*

tivement la concentration en molybdène, la concentration en thiocyanate et la densité optique. A l'examen de la figure 2, nous constatons que les segments de stabilité de la densité optique engendrent, dans l'espace, une surface plane. La projection orthogonale de celle-ci, dans le plan horizontal $xOy$, décrit une aire limitée par deux droites (fig. 3) qui ont pour équation :

$$y = 0{,}075x - 0{,}015 \quad \text{(I)}$$
$$y = 0{,}109x - 0{,}068 \quad \text{(II)}$$

La validité du dosage du molybdène exige que le point représentatif des coordonnées de la concentration molybdique et de la concentration en thiocyanate, soit situé dans l'aire de stabilité de l'oxypentathiocyanatomolybdate.

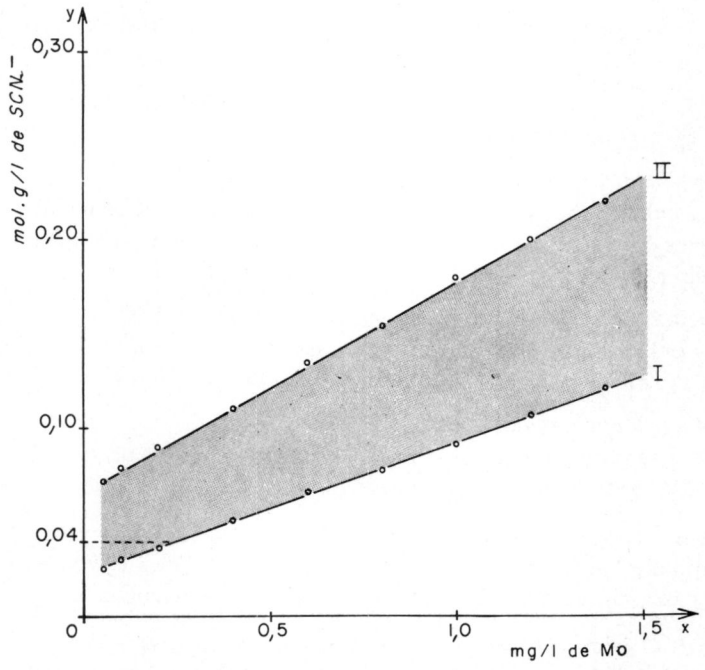



FIG. 3. — *Aire de stabilité du complexe molybdique des ions thiocyanates*

Dans la détermination du molybdène des végétaux, la concentration molybdique de la phase aqueuse est généralement comprise entre 0,01 et 0,10 mg/l de Mo ; or, entre ces deux limites, la valeur optimale de la concentration en thiocyanate est, d'après la figure 3, voisine de 0,04 M ; aussi, avons-nous adopté cette valeur dans la technique proposée.

### 5. — *Influence de l'acidité*

En milieu chlorhydrique et pour une concentration en $SCN^-$ de 0,04 M, le dosage du molybdène est indépendant de l'acidité entre 2 N et 4 N (fig. 4). Dans la méthode proposée, la normalité du milieu de formation du complexe est de 3,15 N HCl.

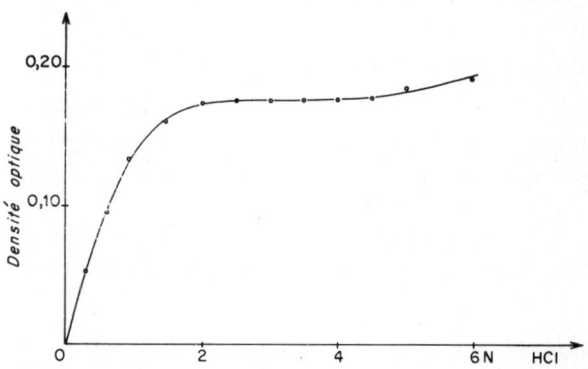



FIG. 4. — *Variation de la densité optique en fonction de la concentration en acide chlorhydrique*

## B. — Caractéristiques de la méthode proposée

### 1. — *Mode opératoire*

a) *Réactifs.*

*Acétate de n-butyle.*

*Solution d'acide chlorhydrique 6 N.*

Dans un ballon jaugé de 1 000 ml, verser 500 ml de HCl concentré ($d = 1{,}19$) et un peu moins de 500 ml d'eau, homogénéiser, laisser refroidir ; compléter à 1 000 ml et homogénéiser.

*Solution à 70 mg/l de cuivre en milieu chlorhydrique 1,5 N.*

Dans un ballon jaugé de 1 000 ml, dissoudre 275 mg de sulfate de cuivre ($CuSO_4$, 5 $H_2O$) avec 250 ml de HCl 6 N. Compléter à 1 000 ml avec de l'eau et homogénéiser.

*Solution d'acide ascorbique à 50 g/l.*

Dans un ballon jaugé de 1 000 ml, dissoudre avec de l'eau 50 g d'acide ascorbique, compléter à 1 000 ml, homogénéiser et conserver à la glacière.

*Solution de thiocyanate d'ammonium 0,2 M.*

Dans un ballon jaugé de 1 000 ml, dissoudre avec de l'eau 15,224 g de $NH_4SCN$, compléter à 1 000 ml, homogénéiser et conserver dans un flacon coloré.

*Solution à 50 g/l de chlorure stanneux en milieu chlorhydrique 2 N.*

Elle doit être préparée extemporanément ; par conséquent, son volume dépend du nombre de mesures à effectuer. Pour la préparation de 100 ml de solution, dissoudre 5 g de $SnCl_2$, 2 $H_2O$ dans 31 ml de HCl 6 N, ajouter 10 ml de la solution à 70 mg/l de cuivre, compléter à 100 ml avec de l'eau et homogénéiser. Utiliser du chlorure stanneux très pur, sinon la solution n'est pas limpide.

*Solution-étalon de molybdène.*

— *Solution-mère à 100 mg/l de Mo.*

Dans un ballon jaugé de 1 000 ml, dissoudre 184 mg de molybdate d'ammonium — $(NH_4)_6$ $Mo_7O_{24}$, 4 $H_2O$ — avec HCl 6 N. Ajuster à 1 000 ml avec HCl 6 N et homogénéiser.

— *Solution-fille à 0,25 mg/l de Mo.*

Introduire 2,5 ml de solution-mère dans un ballon jaugé de 1 000 ml ; compléter à 1000 ml avec HCl 6 N et homogénéiser.

b) *Préparation de l'échantillon.*

— Peser 5 g de matière végétale dans une capsule de porcelaine,

— calciner dans un moufle entre 600 et 700° C, pendant 3 heures,

— après refroidissement des cendres, ajouter 10 ml de HCl 6 N dans la capsule et évaporer à sec sur un bain de sable,

— reprendre le résidu par des fractions de 10 ml de HCl 6 N et recueillir le filtrat dans un ballon jaugé de 50 ml, ajuster le volume à 50 ml.

c) *Colorimétrie.*

Dans une ampoule à décanter de 200 ou 250 ml, mettre :

— le filtrat chlorhydrique de 50 ml,

— 10 ml de la solution à 70 mg/l de cuivre en milieu chlorhydrique 1,5 N,

— 20 ml de la solution à 50 g/l d'acide ascorbique, mélanger par renversement et attendre pendant 2 à 3 minutes,

— 10 ml d'acétate de butyle,

— 20 ml de la solution de thiocyanate 0,2 M, agiter pendant une minute pour extraire le complexe dans la phase organique ; laisser décanter ; après la séparation des deux phases, soutirer totalement la phase aqueuse et la rejeter ; laver ensuite la phase organique avec :

— 10 ml de la solution de chlorure stanneux, agiter pendant une minute ; laisser décanter et éliminer à fond la phase aqueuse.

Recueillir la phase organique dans un tube à essai pour rassembler les gouttelettes d'eau en suspension.

Effectuer les mesures colorimétriques dans une cuve de 3 cm à 468 nm.

d) *Gamme d'étalonnage.*

Les points de la gamme sont obtenus en versant, dans six ampoules à décanter de 200 ou 250 ml, respectivement (voir tabl. 2) : 0, 10, 20, 30, 40, 50 ml de solution à 0,25 mg Mo/l en milieu chlorhydrique 6 N et en complétant à 50 ml avec 50, 40, 30, 20, 10, 0 ml de HCl 6 N ; les opérations suivantes sont décrites ci-dessus.

TABLEAU 2

*Établissement de la gamme*

| µg de Mo dans 10 ml de phase organique | 0 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Solution-fille de molybdène en ml | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Solution de HCl 6 N en ml | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| Solution de cuivre en ml | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Solution d'acide ascorbique en ml | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Solution d'acétate de butyle en ml | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Solution de thiocyanate en ml | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Solution de chlorure stanneux en ml | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

## 2. — *Remarques relatives au mode opératoire*

a) *Poids de la prise d'essai.*

Il est porté à 10 g pour les végétaux pauvres en molybdène, c'est-à-dire ceux dont la teneur est inférieure à 0,15-0,20 p.p.m. de Mo.

Dans le cas de végétaux carencés, il est recommandé de calciner 20 g de matière.

Une prise d'essai de 1 g est suffisante pour les végétaux ayant subi un enrichissement en molybdène. Même, pour des teneurs supérieures à 15 p.p.m. de Mo, le dosage n'est réalisable qu'avec une fraction aliquote du filtrat de reprise chlorhydrique des cendres.

D'une façon générale, il est difficile d'utiliser une même prise d'essai ou plutôt une même reprise chlorhydrique des cendres, pour doser le molybdène et un autre

élément. Par exemple, une prise d'essai unique ne peut servir à déterminer le molybdène et le cobalt ; en effet, l'analyse de ce dernier nécessite 20 g de matière végétale (MORÉ, 1969). A la rigueur, le dosage du zinc, suivant la méthode de DARTIGUES (1966), pourrait être effectué sur une fraction aliquote de la reprise chlorhydrique destinée au dosage du molybdène, car DARTIGUES (1966) utilise une prise d'essai de 1 g et la solution de reprise chlorhydrique, dont le volume est d'environ 25 ml, a une normalité de 2 N ; aussi, dans le cas général, conviendrait-il de :

— calciner 6 g de matière végétale au lieu de 5 g,

— reprendre le résidu de traitement chlorhydrique des cendres par 60 ml de HCl 6 N au lieu de 50 ml,

— prélever, pour le dosage du zinc, 10 ml de la reprise chlorhydrique 6 N et ajouter 20 ml d'eau ; le volume de 30 ml ainsi obtenu aurait une normalité de 2 N et correspondrait à 1 g de prise d'essai.

b) *Température de calcination.*

A la température de 500°C, recommandée par de nombreux auteurs, il subsiste souvent un résidu charbonneux empêchant la mise en solution complète du molybdène.

Le résidu charbonneux disparaît à 600 ou 700°C, suivant la nature du végétal et aussi suivant l'importance de la prise d'essai, à condition, toutefois, que l'aération du moufle ne soit pas limitée ; aussi, afin de faciliter la circulation de l'air pendant la calcination, est-il nécessaire de ne pas bloquer la porte du moufle.

Avec les végétaux riches en alcalins, il est préférable de ne pas calciner au-delà de 600-650°C, sinon il se produit une fusion des cendres entraînant une reprise incomplète du molybdène. Quand ce phénomène est observé, il convient d'attaquer le résidu de calcination par les 10 ml de HCl 6 N, prévus au mode opératoire, et d'y ajouter 2 ml de $HClO_4$ ; l'acide perchlorique provoque une pulvérisation du résidu vitrifié et ainsi la récupération du molybdène est totale.

Jusqu'à 800°C, il n'y a pas de pertes de molybdène par volatilisation au cours de la calcination des végétaux, ceci est en accord avec l'étude de DUPUIS (1949) montrant que l'anhydride molybdique n'est pas volatil au-dessous de cette température.

c) *Traitement chlorhydrique des cendres.*

Nous le pratiquons dans le but, d'une part, d'éliminer le sulfure d'hydrogène susceptible de se former pendant la reprise chlorhydrique des cendres, et, d'autre part, d'insolubiliser la silice.

Au cours de la calcination de certains végétaux, en particulier des crucifères et des algues marines, il se forme des sulfures ; et, dans le milieu de formation du complexe molybdique, la présence de sulfure d'hydrogène inhibe le développement de la coloration jaune-orangé. Mais en chauffant les cendres en milieu acide, le sulfure d'hydrogène se trouve éliminé.

Dans nos conditions opératoires, la silice perturbe le dosage du molybdène quand le milieu de formation du complexe contient plus de 80 mg de Si ; autrement dit, avec une prise d'essai de 5 g, la teneur en silice des végétaux doit être inférieure à 1,6 p. 100 de Si. Bien que nous ayons expérimenté de nombreux végétaux, les pertur-

bations causées par la silice, ne se sont produites qu'à l'analyse des foins et des pailles de céréales ; or, ceux-ci sont particulièrement riches en silice comme l'indique DEMOLON (1956). Avec le traitement chlorhydrique des cendres, une fraction importante de la silice précipite et, ainsi, le dosage du molybdène est réalisé sans formation de gel de silice.

Après la mise en solution du molybdène par l'acide chlorhydrique, il est inutile d'attaquer le résidu siliceux par l'acide fluorhydrique car, contrairement aux remarques de BERTRAND (1961), nous n'avons pas observé de rétention de molybdène par l'insoluble siliceux. En traitant par l'acide fluorhydrique des résidus siliceux d'environ 0,5 g, nous avons constaté que la quantité de molybdène extraite est nulle ou inférieure à 1 p. 100 du molybdène total.

d) *Minéralisation par le mélange nitroperchlorique.*

Ce procédé donne des résultats identiques à ceux de la calcination avec la plupart des végétaux expérimentés : céréales, légumineuses, maïs, betteraves ; mais l'attaque nitroperchlorique ne peut être recommandée pour la minéralisation de certaines plantes telles que les crucifères, les algues marines car, à la formation du complexe et lors du lavage de la phase organique par le chlorure stanneux, il se développe une coloration jaune parasite faussant les résultats par excès.

e) *Colorimétrie.*

Il faut éviter l'utilisation des vaselines aux silicones pour le graissage des rodages des ampoules à décanter sinon une coloration rose instable se développe au contact de la phase organique ; en outre, un trouble apparaît lors de la formation du complexe, et, comme il reste en suspension, sa présence perturbe les mesures colorimétriques. Le développement d'une coloration rose s'observe aussi quand la phase organique entre en contact avec le rodage à l'émeri des flacons et des tubes à essai. De plus, la phase organique se trouble quand la solution de chlorure stanneux utilisée n'est pas limpide.

TABLEAU 3

*Pourcentage de molybdène retrouvé après addition de 5 µg de Mo dans des échantillons de divers végétaux*

| Nature du végétal | Teneur en molybdène en p.p.m. de Mo | Pourcentage de molybdène retrouvé |
|---|---|---|
| Betteraves (racines) | 0,05 | 99 |
| Pommes de terre (tubercules) | 0,20 | 98 |
| Maïs (tiges) | 0,22 | 99 |
| Maïs (feuilles) | 0,36 | 99,5 |
| Maïs (épis) | 0,12 | 99,5 |
| Choux-fourragers (tiges) | 0,44 | 98,5 |
| Choux-fourragers (feuilles) | 0,66 | 100 |
| Trèfle violet | 0,64 | 96,5 |
| Luzerne | 0,85 | 98 |
| Trèfle blanc | 1,27 | 102 |
| Fétuque des prés | 1,57 | 101 |
| Ray-grass | 2,10 | 99 |
| Dactyle | 3,70 | 96 |

Il est inutile de faire une gamme d'étalonnage pour chaque série de dosages, il suffit de faire un essai à blanc.

### 3. — *Contrôle de la méthode par addition de molybdène*

Le molybdène est ajouté à la prise d'essai avant la calcination sous forme de solution de molybdate d'ammonium, à raison de 5 µg de Mo pour chaque échantillon. Nous reportons, dans le tableau 3, la teneur des végétaux utilisés et le pourcentage de molybdène retrouvé dans les échantillons ayant reçu 5 µg de Mo.

D'après les valeurs du tableau 3, le pourcentage de molybdène retrouvé est, en moyenne, de 99 p. 100 ; par conséquent, dans le mode opératoire proposé, les interférences sont négligeables.

### 4. — *Reproductibilité de la méthode*

Les essais de reproductibilité ont été réalisés sur plusieurs végétaux de nature variée et avec une gamme assez étendue de teneurs en molybdène. Les résultats du tableau 4 montrent que la reproductibilité de la méthode est satisfaisante.

## III. — CONCLUSIONS

Diverses méthodes sont proposées pour le dosage du molybdène des végétaux. Les unes sont basées sur des réactions colorimétriques du molybdène avec des composés tels que le thiocyanate et le dithiol ; d'autres reposent sur des procédés physiques : polarographie, spectrographie d'émission, fluorescence X, spectrophotométrie d'absorption atomique, activation neutronique. L'examen des caractéristiques de ces méthodes (tabl. 1) montre que les plus rapides, c'est-à-dire la spectrographie d'émission et la fluorescence X, ont une sensibilité très insuffisante pour la détermination du molybdène dans la majorité des végétaux. En revanche, les méthodes qui nécessitent une plus longue préparation de l'échantillon, ont une limite de sensibilité permettant de doser le molybdène dans tous les végétaux, même dans les plus pauvres en cet élément ; c'est le cas de la colorimétrie, de la polarographie, de l'activation neutronique. De ces trois dernières techniques, la méthode au thiocyanate, telle que nous la décrivons, est la mieux adaptée au dosage du molybdène en série. Elle ne nécessite pas, en particulier, toutes les manipulations de séparation chimique exigées par certains réactifs colorimétriques comme le dithiol, le 2-amino-4-chlorobenzènethiol.

La méthode au thiocyanate proposée est caractérisée par la substitution du thiocyanate au chlorure stanneux pour la réduction de Mo (VI) en Mo (V). Une étude de l'influence des composés, intervenant dans la réaction de formation du complexe, nous a permis de mettre en évidence l'existence d'une aire à l'intérieur de laquelle le complexe est stable et la sensibilité maximale. Grâce à la connaissance de cette propriété, il nous a été possible de définir, de façon rationnelle, la concentration optimale de thiocyanate en fonction des concentrations molybdiques rencontrées au cours de l'analyse des végétaux les plus divers.

TABLEAU 4

*Variabilité des résultats analytiques*

| Nature du végétal | Poids de la prise d'essai en g | Nombre d'analyses | Teneur moyenne en p.p.m. Mo | Teneurs extrêmes p.p.m. Mo | | Écart-type p.p.m. Mo | Coefficient de variation en p. 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Minimale | Maximale | | |
| Maïs 1 ..... | 10 | 11 | 0,11 | 0,10 | 0,14 | 0,011 | 10,00 |
| Pomme de terre (tubercule) ..... | 10 | 8 | 0,20 | 0,16 | 0,22 | 0,023 | 11,50 |
| Maïs 2 ..... | 5 | 12 | 0,27 | 0,25 | 0,31 | 0,015 | 5,55 |
| Luzerne ..... | 5 | 14 | 0,58 | 0,56 | 0,62 | 0,021 | 3,62 |
| Trèfle blanc ..... | 5 | 14 | 1,23 | 1,21 | 1,26 | 0,022 | 1,79 |
| Ray-grass 1 ..... | 5 | 7 | 1,27 | 1,24 | 1,30 | 0,019 | 1,49 |
| Choux fourragers .... | 5 | 10 | 1,34 | 1,31 | 1,38 | 0,022 | 1,64 |
| Dactyle..... | 2 | 14 | 3,76 | 3,75 | 3,82 | 0,024 | 0,64 |
| Ray-grass 2 ..... | 2 | 12 | 5,90 | 5,85 | 6,00 | 0,054 | 0,91 |

La préparation de l'échantillon comporte la calcination de la matière végétale à une température comprise entre 600 et 700°C ; l'attaque par le mélange nitroperchlorique n'est pas recommandée pour la minéralisation de certains végétaux. Un traitement chlorhydrique des cendres permet d'éliminer les sulfures et la silice qui perturbent le dosage. La mise en solution du molybdène est complète à condition qu'il ne subsiste pas de résidu charbonneux. Enfin, les essais réalisés montrent que la méthode est reproductible, sensible ($\varepsilon = 18\,900$), simple et relativement rapide ; en effet, une personne peut, sans difficultés, effectuer, en une journée, l'équivalent de toutes les manipulations nécessaires à la détermination du molybdène de 15 échantillons de plantes.

*Reçu pour publication en septembre 1970.*

## SUMMARY

DETERMINATION OF THE MOLYBDENUM CONTENT IN PLANTS.
ANALYSIS OF THE VARIOUS DETERMINATION PROCESSES
DEVELOPMENT OF A COLORIMETRIC THIOCYANATE METHOD

Various methods, such as colorimetry, polarography, flame spectrography, X-ray fluorescence, nuclear absorption spectrophotometry and neutron activation have been put forward. Going into the operating procedure and the sensitivity limits of these methods (table 1) shows that the faster techniques, that is, flame spectrography and X-ray fluorescence have a sensitivity which is inadequate for the determination of molybdenum in most plante. Conversely, the methods which require a more extensive preparation of the sample have a sensitivity limit which permits of determining the molybdenum content in all plants ; such is the case of colorimetry, polarography and neutron activation. Of these three techniques, the thiocyanate method, described herein, is the best suited to repetitive molybdenum determinations. It does not require all the handling some reagents, such as dithiol, need.

The thiocyanate method put forward is characterized by the substitution of stannous chloride for thiocyanate through reduction of Mo (VI) into Mo (V). Investigating the effects of the compounds involved in the formation of the complex has allowed us to show that there is an area within which the complex is stable and the sensitivity utmost. This information has enabled us to define rationally the best thiocyanate concentrate in terms of the molybdic concentrations met with when analyzing a wide range of plants.

Preparation of the sample involves calcination of the plant material at a temperature from 600 to 700 degrees centigrade ; to mineralize some plants, attack by means of the nitroperchloric mixture is not recommended, especially for such plants as cruciferae and sea-weed. A hydrochloric treatment of the ashes enables to eliminate the sulphides and the silica which disturb the determination. The molybdenum is fully brought into solution provided that there remain no carbon residue. The tests made show that the method is reproducible, and is sensitive ($\varepsilon = 18\,900$). The method is simple and comparatively fast and a single analyst can carry out on the average, the determination of 15 samples of molybdenum daily.

## ZUSAMMENFASSUNG

DIE DOSIERUNG DES MOLYBDÄNS IN DEN PFLANZEN.
UNTERSUCHUNG DER VERSCHIEDENEN BESTIMMUNGSVERFAHREN.
AUSARBEITUNG EINER KOLORIMETRISCHEN METHODE MIT THIOCYANAT

Verschiedene Methoden für die Dosierung des Molybdäns der Pflanzen werden vorgeschlagen : Kolorimetrie, Polarographie, Emissionsspektrographie, Fluoreszenz X, atomische Absorptionsspektrofotometrie, neutronische Aktivierung. Die Prüfung des Arbeitsverfahrens und der Empfindlichkeitsgrenzen dieser Methoden (Abb. 1) zeigt, dass die schnellsten Methoden d. h. : die Emissionsspektrographie und die Fluoreszenz X-Methode, eine sehr ungenügende Empfindlich-

keit für die Bestimmung des Molybdäns in den meisten Pflanzen aufweisen. Dagegen bieten die Methoden, die eine längere Vorbereitung der Probe erfordern, eine Empfindlichkeitsgrenze, die die Dosierung des Molybdäns in allen Päanzen erlaubt. Dies ist der Fall der Kolorimetrie, der Polarographie, der neutronischen Aktivierung. Von diesen drei Verfahren ist die in dieser Arbeit beschriebene Thiocyanatmethode für die reihenmässige Dosierung des Molybdäns die geeignetste. Sie verlangt nicht die durch bestimmte Reagentien, wie Dithiol. notwendigen zahlreichen Handhabungen.

Die vorgeschlagene Thiocyanatmethode zeichnet sich durch die Ersetzung des Zinnchlorürs durch das Thiocyanat für die Reduktion von Mo (VI) in Mo (V) aus. An Hand einer Untersuchung über die Einwirkung der bei der Bildung des Komplexes einwirkenden Verbindungen konnten wir das Vorhandensein einer Zone feststellen, innerhalb derer eine Stabilität des Komplexes und eine maximale Sensibilität vorherrschen. Dank der Erkenntnis dieser Eigenschaft, wurde es uns möglich, in Funktion zu den im Laufe der Analyse von verschiedensten Pflanzen begegneten molybdänischen Konzentrationen, die optimale Konzentration des Molybdäns durch Berechnung festzustellen.

Die Vorbereitung der Probe besteht in der Kalzinierung des Pflanzenstoffes bei einer Temperatur zwischen 600 und 700°C ; der Angriff durch die nitroperchloridische Beimischung ist für die Vererzung bestimmter pflanzen nicht zu empfehlen, besonders für Kreuzblütler und Seealgen. Eine Salzsflure-Behandlung der Asche erlaubt die Ausscheidung der Schwefelverbindung und der Kieselerde, die die Dosierung stören. Die Auflösung des Molybdäns ist vollständig, vorausgesetzt dass keine kohlenartige Rückstände bestehen. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die Methode reproduzierbar, empfindlich — $\varepsilon = 18\,900$ — und einfach ist, und dass sie verhältnismässig schnell ist. Eine Person ist imstande, pro Tag durchschnittlich die Molybdänbestimmungen von 15 Proben zu erledigen.

## РЕЗЮМЕ

*Дозаж молибдена в растительном материале. Обсуждение различных способов определения этого элемента. Разработка колориметрического метода с тиоцианатом.*

Л. ДЮВАЛЬ.

Автор сравнивает различные методы дозажа молибдена в растительном материале : колориметрический, полярографический, метод спектрографии излучения, флуоресценции X, спектрофотометрии атомного поглощения, нейтронной активации. Изучение операционных способов и границ чувствительности этих методов (таблица № 1) показывает что наиболее скорые технические приемы т. е. спектрография излучения и флуоресценция X, недостаточно чувствительны для определения молибдена в большинстве растений. И напротив, граница чувствительности методов требующих более длительной подготовки образца, позволяет дозировку молибдена во всех растениях : колориметрия, полярография, нейтронная активация. Из этих трех методов, тиоциановый метод, описанный в данной работе, лучше всего приспособлен для серийных дозажей молибдена, ибо он не требует того количества манипуляций, которое необходимо для некоторых реактивов, как например дитиол.

Предлагающийся тиоциановый метод характеризуется заменой солянокислого олова тиоцианатом для восстановления Mo (VI) до Mo (V). Изучение влияния соединений принимающих участие в реакции образования комплекса, позволило автору выявить существование зоны, внутри которой комплекс устойчив, а чувствительность — максимальна. Зная эту особенность, стало возможным рациональное определение оптимальных концентраций тиоцианата, в зависимости от концентраций молибдена встречающихся во время анализов самых различных растений.

Приготовление образца состоит из сжигания в температуре от 600 до 700°; при минерализации некоторых растений, как например крестоцветные, или морские водоросли, не рекомендуется атаковать при помощи нитро-перхлоратной смеси. Обработка золы соляной кислотой удаляет сернистые соединения и кремний, нарушающие дозаж. Молибден полностью растворяется, при условии отсутствия углеобразного остатка. Проведенные опыты показали что метод воспроизводим, чувствителен ($\varepsilon$ = 18.900), прост, и относительно скор, ибо один лаборант может провести определения молибдена в 15-ти образцах за 1 день.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ADAMIEC I., 1966. Perfectionnement de la méthode de dosage du molybdène au thiocyanate (pol.). *Chemia Analityczna*, **11**, 1183-1190.

ARNON D. I., STOUT P. R., 1939. Molybdenum as an essential element for higher plants. *Plant Physiol.*, **14**, 599-602.

BERTRAND D., 1961. Sur une nouvelle technique de microdosage du molybdène, applicable aux milieux biologiques. *C. R. Acad. Sci.*, **253**, 2977-2979.

BESSON J., 1962. La carence en molybdène du melon. *Phytoma*, **134**, 27-28.

BORTELS H., 1930. Molybdän als katalysator bei der biologischen stickstoffbindung. *Arch. Mikrobiol.*, **1**, 333-342.

BOULIN R., JAUDON E., 1965. Méthode de dosage du molybdène. Applications aux aciers. *Chim. Anal.*, **47**, 290-298.

BRANDT C. S., LAZAR V. A., 1958. Analysis of dried plant material by X-ray emission spectrograph. *Agr. Food. Chem.*, **6** (4), 306-309.

CHAPMAN H. D., 1966. *Diagnostic criteria for plants and soils*. University of California. Division of Agricultural Sciences, Riverside édit.

CHARLOT G., 1966. *Les méthodes de la chimie analytique. Analyse quantitative minérale.* Masson et C^ie^ édit., Paris.

CONNOR J., BASS S. T., 1962. Use of a high-voltage AC arc source for the spectrochemical analysis of plant tissue. *Appl. Spectr.*, **16**, 150-154.

COTTENIE A., 1962. Mise au point d'une méthode quantométrique pour l'analyse des sols et des végétaux. *Pédologie*, **12** (2), 180-195.

CROUTHAMEL C. E., JOHNSON C. E., 1954. Thiocyanate spectrophotometric determination of molybdenum and tungsten. *Anal. Chem.*, **26**, 1284-1291.

CUNNINGHAM I. J., 1955. Diseases caused by deficiencies of trace elements. *Adv. Veter. Sci.*, **2**, 138-181.

DARTIGUES A., 1966. Application d'une technique simple pour le dosage chimique du zinc dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **17**, 75-89.

DEMARÇAY E., 1900. Sur la présence dans les végétaux du vanadium, du molybdène et du chrome. *C. R. Acad. Sci.*, **130**, 91-92.

DEMOLON A., 1956. *Principes d'Agronomie.* Tome II. Croissance des végétaux cultivés ; Dunod édit., Paris.

DICK A. T., BINGLEY J. B., 1947. The determination of molybdenum in plant and animal tissue. *Austr. J. Expt. Biol. Med. Sci.*, **25**, 193-202.

DUPUIS T., 1949. Sur la volatilité de l'anhydride molybdique. *C. R. Acad. Sci.*, **228**, 841-843.

GUENNELON R., SOUTY N., 1964. Dosage du molybdène dans les végétaux par fluorescence X. *C. R. Trav. St. Agr. I. N. R. A.*, 4 D.

HAMENCE J. H., 1940. A new test for the detection of molybdenum and tungsten. *Analyst*, **65**, 152-154.

HOOVER W. L., DUREN S. C., 1967. Determination of molybdenum in fertilizers by atomic absorption spectrophotometry. *J. Ass. Off. Anal. Chem.*, **50** (6), 1269-1273.

HUGUET F., 1961. Observations sur la carence en molybdène. *C. R. Trav. St. Agr. I. N. R. A.*, 13 D.

JONES G. B., 1954. The polarographic estimation of molybdenum in plants materials. *Anal. Chim. Acta*, **10**, 584-590.

KOLLING O. W., 1965. Molybdenum (V)-thiocyanate complex extracted into chloroform. *Anal. Chem.*, **37**, 436-437.

LAGAUDE V., 1959. Une maladie de carence du chou-fleur. *Phytoma*, **108**, 33-34.

LAZAR V. A., BEESON K. C., 1958. The determination of copper and molybdenum in plants by X-ray spectrography. *J. Ass. Off. Anal. Chem.*, **41** (2), 416-419.

LIVINGSTON H. D., SMITH H., 1967. Estimation of molybdenum in biological material by neutron activation analysis. *Anal. chem.*, **39**, 538-539.

MILBOURN M., 1937. The spectrographic analysis of soils and plants materials particularly for minor elements. *J. Soc. Chem. Ind.*, **56**, 205-209.

MITCHELL R. L., SCOTT R. O., 1947. Concentration methods in spectrographic analysis. II. Recovery of trace constituents in plants materials and soil extracts by mixed organic reagents. *J. Soc. Chem. Ind.*, **66**, 330-336.

MORÉ E., 1969. Sur le microdosage colorimétrique du cobalt dans les végétaux : interférence du fer, contaminations par la terre. *Ann. agron.*, **20**, 527-538.

NANGNIOT P., 1964. Le dosage oscillopolarographique des oligo-éléments métalliques dans les végétaux. *J. Electroanal. Chem.*, **7**, 50-59.

NICHOLS M. L., ROGERS L. H., 1944. Determination of small amounts of molybdenum in plants and soils. *Ind. Eng. Chem., Anal. Ed.*, **16** (2), 137-140.

PINTA M., 1955. Applications de la spectrographie de flamme et d'arc dans l'analyse agronomique. *Ann. agron.*, **2**, 189-202.

PIPER C. S., BECKWITH R. S., 1948. A new method for determination of small amounts of molybdenum in plants. *J. Soc. Chem. Ind.*, **67**, 374-379.

PRIETO-BOUZA A., 1960. Molibdeno total y asimilable en suelos de prado gallegos. *Bol. Univ. Compostelana*, **68-69**, 223-342.

ROBINSON W. O., EDGINGTON G., 1954. Availability of soil molybdenum as shown by the molybdenum content of many different plants. *Soil Sci.*, **77**, 237-251.

RODERBOURG J., MASSAUX F., KIRCHMANN R., 1963. Application de l'analyse par radioactivation au dosage du molybdène dans les légumineuses. *Bull. Inst. Agr. St. Rech.* Gembloux, **31** (4), 537-549.

RUDA E., 1961. Einige Beobachtungen auf einem Molybdänreichen Pflanzenstandort. *Z. Pflernähr. Düng.*, **92**, 32-35 (in Soils and Fertilizers 1961, 184).

RUTTEN P., 1964. Relations entre les accidents de végétation dans la région du Bas-Rhône-Languedoc. **95**e *Congrès Pomologique*, 118-123.

SSEKAALO H., JOHNSON R. M., 1969. Determination of molybdenum in biological materials with 2-amino-4-chlorobenzenethiol. *J. Sci. Food Agr.*, **20**, 581-583.

STEINBERG R. A., 1936. Relation of accessory growth substances to heavy metals, including molybdenum, in the nutrition of *Aspergillus niger*. *J. agr. Res.*, **52** (6), 439-447.

STEINBERG R. A., 1937. Role of molybdenum in the utilization of ammonium and nitrate nitrogen by *Aspergillus niger*. *J. agr. Res.*, **55** (12), 891-902.

THILLIEZ G., 1964. Photométrie de flamme par absorption atomique. Description d'un appareillage mis au point au laboratoire. Résultats obtenus et applications. *Chim. Anal.*, **46**, 3-22.

WILSON A. M., MCFARLAND O. K., 1964. Quantitative conversion of molybdate to Mo (V) by the stannous chloride-perchlorate reaction and spectrophotometric determination as tricaprylylmethylammonium oxytetrathiocyanatomolybdate (V). *Anal. Chem.*, **36**, 2488-2493.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions* f) *résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve a corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le Directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 5-1971

*Dépôt légal: 2e trimestre 1971. N° d'impression: 291.*

# annales agronomiques

Bimestriel

1971

Vol. 22. N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, PARIS-7e

*Ann. agron.*, 1971, **22** (2), 155-181.

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'ÉVOLUTION DES MICAS (BIOTITES)

## II. — Les autres possibilités d'évolution des micas et leur place par rapport a la vermiculitisation

M. ROBERT

*Laboratoire des Sols,*
*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

RÉSUMÉ

Au cours de ce travail les résultats de nombreuses expériences où l'on a fait varier le pH (de 0 à 14), la nature et la concentration des cations, la nature de l'anion (complexant ou non) sont présentés et discutés.

En se basant sur la vitesse relative de libération des différents éléments du réseau des biotites placées dans ces conditions très diverses, on peut établir un schéma de l'évolution de ces minéraux.

Ce schéma couvre l'ensemble des conditions qui peuvent intervenir dans le milieu naturel et permet de définir les différents processus d'évolution qui en découlent.

## INTRODUCTION

Les études précédentes (Robert, 1971) ont porté essentiellement, soit sur l'extraction des ions $K^+$ fixés dans l'espace interfoliaire, soit sur les modifications de la charge de la couche octaédrique.

Avec ces 2 types d'actions spécifiques, nous avons, semble-t-il, fait le tour des possibilités de transformations d'un minéral micacé *sans modifier fondamentalement la structure*. Notons toutefois que ces traitements ont modifié déjà la proportion d'$OH^-$.

Pour situer ce processus parmi l'ensemble des conditions que l'on peut rencontrer dans le milieu naturel, nous allons relater les résultats d'une série d'expériences

dans lesquelles les micas ont été soumis à des actions physico-chimiques susceptibles d'assurer la vermiculitisation, mais simultanément de provoquer une altération plus ou moins profonde des feuillets.

## A. — ACTION DE L'EAU

Nous avons pu noter au cours des expériences antérieures que les phénomènes d'échange, au niveau des espaces interfoliaires des micas, dépendent étroitement de la concentration extérieure en cations : ainsi, dès la concentration de $10^{-3}$ N, ils apparaissent comme très réduits, et on peut se demander si avec l'eau distillée (concentration en $H^+ \simeq 10^{-7}$), ils ne deviennent pas négligeables vis-à-vis des phénomènes d'hydrolyse.

Nous avons réalisé 2 types d'expériences qui nous serviront de référence pour délimiter l'action de l'eau.

### 1. — *Expérience en système fermé* (avec renouvellement)

Ce sont les conditions expérimentales qui nous ont servi dans les chapitres précédents, mais avec de l'eau seule.

Les micas (biotite de Varennes) ont été placés en récipient de gaflon au contact d'eau distillée à 80°C qui était renouvelée tous les 4 jours. La figure 1 permet de comparer la libération du potassium à celle de la silice qui, ne pouvant pas être libérée par des phénomènes d'échange, correspond à une destruction de la couche tétraédrique par un effet d'hydrolyse.

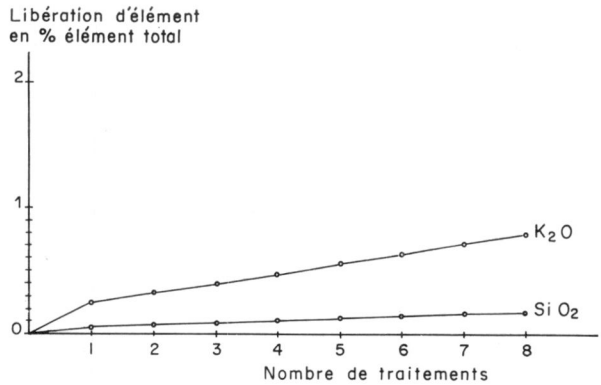



FIG. 1. — *Libération de $K_2O$ et de $SiO_2$ au cours de traitements de la biotite de Varennes par l'eau* (80°C)

On peut voir que le potassium, exprimé en p. 100 du $K_2O$ présent dans le minéral, est libéré en quantité 4 à 5 fois plus forte que la silice ; en sorte que ce mica pourrait donc être théoriquement ouvert en totalité avec 1 000 renouvellements ; notons cependant que durant le même temps, environ 25 p. 100 des couches tétraédriques seraient détruites.

Cette expérience peut nous servir de référence pour tous les essais réalisés précédemment ; ainsi, si le degré d'hydrolyse reste sensiblement le même dans une solution de chlorures (Na, Mg), on aurait détruit environ 1 p. 100 des couches tétraédriques après les 30 renouvellements nécessaires pour une extraction totale du potassium.

Avec un tel dispositif expérimental, nous opérons en système fermé et les réactions ont le temps d'atteindre un équilibre avant le renouvellement de la solution.

Dans une deuxième série d'expériences, les micas ont été soumis à un lessivage rapide par l'eau, c'est-à-dire en système ouvert de manière que les équilibres n'aient pas le temps de s'établir.

### 2. — *Expériences en système ouvert* (Soxhlet)

Par cette méthode, nous avons traité pendant plus d'un an, un mica trioctaédrique (phlogopite de Madagascar) et un mica dioctaédrique (muscovite de Madagascar). Le drainage moyen était voisin de 3 litres par jour pour une eau distillée à une température de 55° à 60°C.

Les analyses des lessivats obtenus au cours de 2 ans d'expérience sont rassemblées dans le tableau 1.

TABLEAU 1

*Composition moyenne des eaux de lessivage* (soxhlet)

| Composition moyenne des eaux de lessivage | | Produit total entraîné (calciné à 1 000 °C) | | Composition | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | en mg | en % du poids de mica en expérience | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | CaO | $K_2O$ | $Na_2O$ |
| Phlogopite | 1re année | 1 013 | soit 2 | 71,6 | 7,1 | 0,8 | 4,7 | 1,8 | 9,6 | 4,4 |
| | 2e année | | | 71,5 | 6,4 | 1,8 | 6,60 | 1,3 | 7,4 | 4,9 |
| Muscovite (2 ans) | | 290 | soit 0,5 | 73 | 4,4 | 3,4 | 0,7 | 4,9 | 6,6 | 7 |

L'examen de ces données conduit aux remarques suivantes :

Si la phlogopite évolue 4 fois plus vite (quantité dissoute 4 fois plus forte) que la muscovite, la composition des eaux de drainage est, par contre, sensiblement la même et présente en particulier le même rapport Si/K.

Ce n'est donc plus l'échange d'ion qui joue comme dans les expériences réalisées précédemment (le potassium serait alors beaucoup plus facilement libéré pour la phlogopite que pour la muscovite), mais un processus différent : l'hydrolyse totale.

On constate ensuite que dans ces conditions c'est la silice qui est extraite préférentiellement, et plus rapidement en particulier que le potassium.

Si on se réfère à l'expérience précédente en système fermé avec l'eau, il y a donc une inversion de la vitesse de libération du potassium et de la silice.

Ainsi, dans « l'expérience soxhlet », on réalise une hydrolyse totale, alors qu'avec un renouvellement de la solution tous les 4 jours, l'hydrolyse est limitée.

## B. — VERMICULITISATION ET RÉACTIONS D'ACIDOLYSE

Tous les essais de vermiculitisation ont été effectués à des pH voisins de la neutralité. (Seul le cobaltinitrite était utilisé à un pH de 4, donc déjà en milieu acide). Nous avons donc été amenés à réaliser une série de traitements en conditions plus acides en conservant le même anion de type non complexant ($Cl^-$) que pour les expériences d'échanges ayant mis en œuvre des chlorures.

Dans une seconde série d'expériences, nous examinerons ensuite le cas de l'intervention d'un anion de type complexant.

### 1. — *Expériences à pH = 2,5.*

Elles ont utilisé :

— soit le chlorure d'un cation trivalent hydrolysable $AlCl_3$ N, qui nous permet d'obtenir une concentration élevée en cations sans trop abaisser le pH ;

— soit un acide fort au même pH, HCl N/300 qui au contraire représente une faible concentration en protons.

Avec comme matériau la biotite de Varennes, nous avons retenu des conditions identiques à celles de nos expériences de vermiculitisation (récipient gaflon-solution à 80°C). Les résultats seront d'ailleurs rapportés dans le même ordre :

extraction du $K_2O$ ;
bilan minéralogique ;
bilan chimique.

a) *Extraction du $K_2O$.*

Sous l'action de $AlCl_3$ N, l'extraction de $K_2O$ (fig. 2), est très comparable et même supérieure à celle obtenue avec les chlorures de sodium ou de magnésium. L'expérience a été arrêtée alors que 80 p. 100 du $K_2O$ de la biotite était extrait, bien que l'extraction totale semble parfaitement possible.

Pour les traitements avec HCl N/300 au même pH (2,5), la libération est encore nette mais beaucoup plus faible. Nous avons arrêté l'expérience alors que 50 p. 100 environ du $K_2O$ était extrait.

Les cations trivalents et les protons se montrent donc capables comme les autres cations de s'échanger contre le potassium des micas.

b) *Évolution minéralogique*

L'analyse thermopondérale met en évidence les conséquences de l'ouverture des feuillets de micas (fig. 3), et ce phénomène a été précisé en suivant la variation des équidistances *d* (001) (tabl. 2) à l'aide des rayons X.

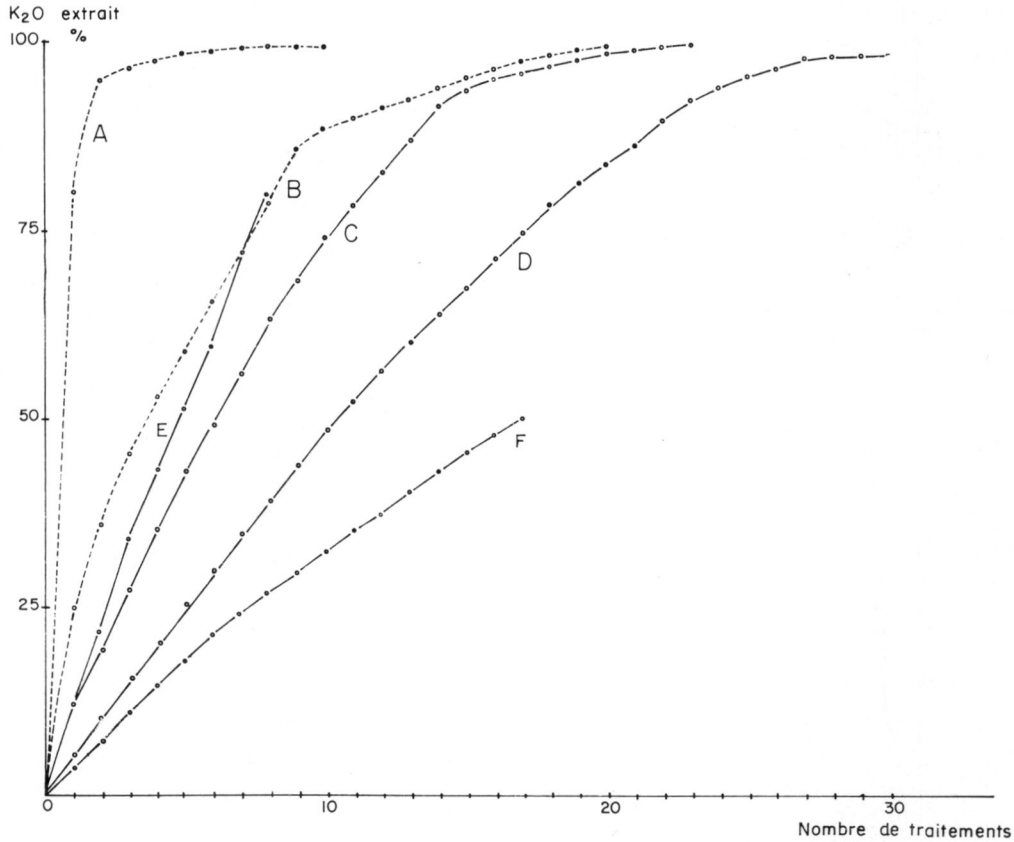



FIG. 2. — *Libération de $K_2O$ au cours de différents traitements*
A : Cobaltinitrite de Na B : Tétraphénylborate C : $MgCl_2$ N
D : NaCl N E : $AlCl_3$ N F : HCl N/300

Les biotites ont donc été ouvertes par l'échange du potassium contre $Al^{3+}$ ou $H^+$.

Toutefois, leur comportement n'est pas celui des vermiculites typiques : mais celui des vermiculites Al ou des intergrades hydroxy-alumineux (JACKSON, 1963). C'est ainsi que les capacités d'échanges mesurées atteignent seulement 35 à 40 méq/100 g de mica calciné (pour un produit où le potassium n'a été extrait qu'à 80 p. 100).

Après un traitement à chaud avec un complexant énergique de l'aluminium, le citrate de sodium 0,3 M (TAMURA, 1957), le minéral retrouve à la fois sa capacité d'échange et la propriété de se refermer à 10 Å par une saturation au potassium ; ses caractéristiques étaient bien liées à la présence d'ions $Al^{3+}$ plus ou moins évolués.

La biotite traitée par HCl N/300 a un comportement très semblable à la biotite traitée par $AlCl_3$ ; ce qui conduit à supposer que ce traitement libère des ions $Al^{3+}$.

c) *Bilan chimique de l'évolution.*

Ces premiers résultats semblent établir une identité de comportement entre les différents réactifs chlorures neutres ou acides. En réalité, dès que l'on réalise un bilan chimique, l'analogie devient moins nette.

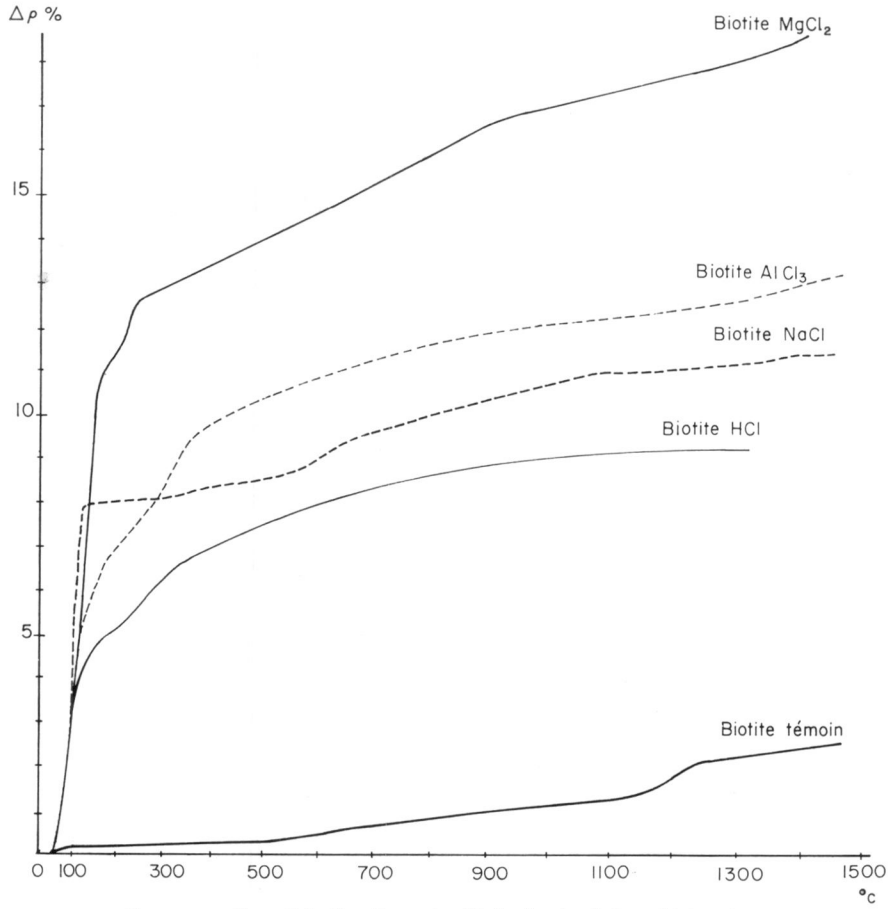



FIG. 3. — *Caractérisation thermopondérale des produits expérimentaux*

TABLEAU 2

*Valeur de d* (001) *au cours de différents tests*

| | Produit nature | Échange par $MgCl_2$ à froid | Chauffage 400°C | Traitement K Cl à froid | Traitement acétate $NH_4$ à froid | Traitement citrate Na 0, 3 M (TAMURA) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Biotite $AlCl_3$ | 14,20 Å | — | ≃ 10,25 Å | 14,20 | 14,20 | ≃ 10 Å |
| Biotite HCl | 11,80 Å | 14,70 Å | ≃ 10,24 Å | 11,80 | 11,80 | ≃ 10 Å |

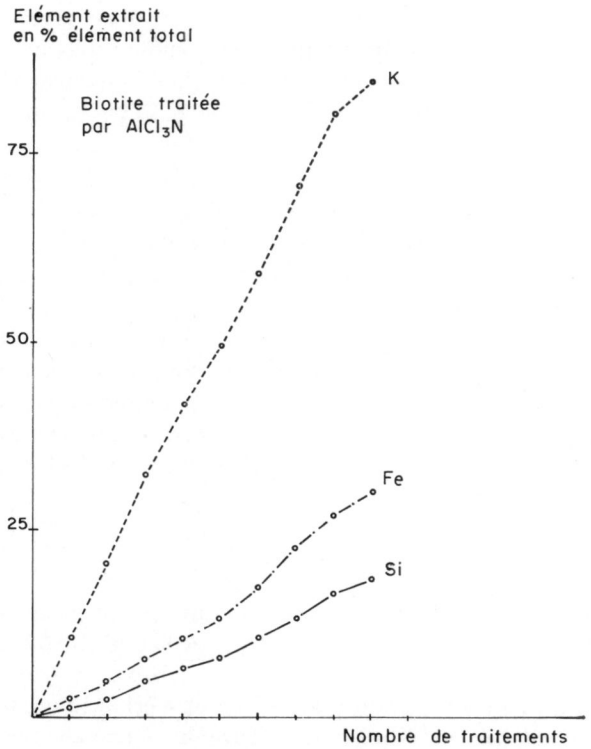



FIG. 4. — *Libération de différents éléments du réseau de la biotite en fonction du temps* ($AlCl_3$ N) — pH = 2,5

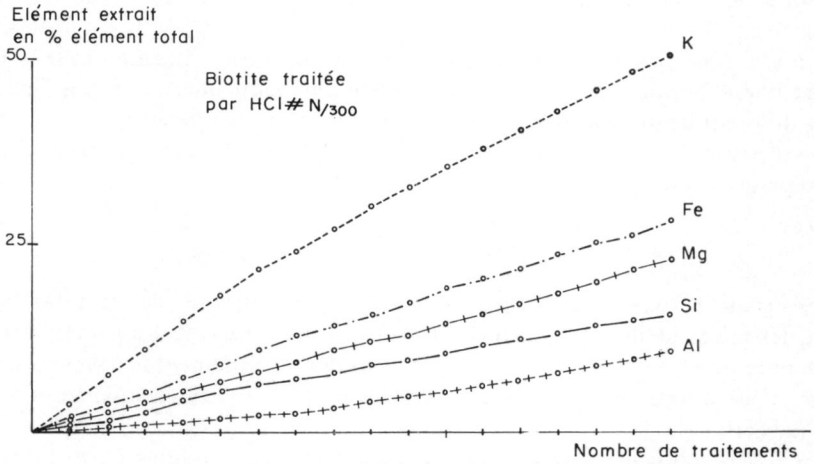



FIG. 5. — *Libération de différents éléments du réseau de la biotite*

En milieu neutre par exemple, nous ne constations aucune variation de poids des échantillons au cours des expériences. En milieu acide, le poids de l'échantillon diminue au cours des traitements ; l'extraction du potassium n'est donc pas sélective et elle s'accompagne de la libération de nombreux autres éléments du réseau.

Comparons donc la libération des éléments situés, soit dans les espaces interfoliaires (K), soit en couche octaédrique (Fe, Mg), soit en couche tétraédrique (fig. 4 et 5) :

— il apparaît tout d'abord que la vitesse de libération du potassium reste très supérieure à celle de Fe, Al, Si ; K sera donc extrait en totalité avant que le minéral ne soit détruit, et l'on constate une ouverture des feuillets à 14 Å ;

— notons d'autre part, que la couche octaédrique (Fe-Mg) se détruit plus rapidement que la couche tétraédrique (Si-Al).

Le processus de vermiculitisation reste donc possible à pH 2,5, soit par échange contre un cation trivalent commun dans les sols comme Al, soit apparemment sous l'action de protons (ROBERT, 1968). Ceux-ci, une fois fixés, migreront en couche octaédrique ou tétraédrique, provoquant la diffusion des ions Al ou Fe vers les positions interfoliaires (GLAESER *et al.*, 1960). C'est ce qui explique la similitude de comportement entre les produits traités par $AlCl_3$ ou par HCl.

### 2. — *Expériences en milieu HCl N*

Les résultats précédents sont différents de ceux obtenus en milieu acide plus concentré, sur biotite (MEHMEL, 1938 ; GASTUCHE, 1963), ou sur illite (ARVIEU et CHAUSSIDON, 1964).

Nous avons donc voulu connaître le comportement de notre échantillon de référence (biotite de Varennes) dans les conditions d'expérience de ce travail (température, rapport minéral/solution...), à des pH plus bas (traitements par HCl N). Les résultats sont reportés sur la figure 6 : la libération des éléments du réseau s'effectue à la même vitesse et proportionnellement à la quantité présente dans le minéral, sauf pour la silice, où la quantité libérée est limitée par sa solubilité (ici 20 mg/100 $cm^3$ à 80°C).

Il n'y a donc pas de sortie préférentielle du potassium. Lorsque tout le potassium est libéré, le mica est détruit et il subsiste un résidu siliceux (18 mg $SiO_2$ pour 100 mg de produit) qui conserve d'ailleurs une structure feuilletée.

L'ouverture des biotites ne peut donc pas avoir lieu dans ce cas, contrairement à ce que nous avons constaté avec pH 2,5.

### 3. — *Traitement par des agents complexants*

Ces dernières expériences montrent que lorsque le pH devient trop faible, l'ouverture des micas ne peut plus intervenir, ceux-ci se détruisant d'une façon sensiblement congruente. Il est évident que si l'on considère uniquement la concentration en protons, nous avons peu de chance de trouver des conditions analogues dans le milieu naturel.

Par contre, on peut se demander quelles seraient les conséquences de l'intervention de complexes qui favorisent l'extraction des cations di- ou trivalents (Mg, Fe, Al) généralement situés en couche octaédrique.

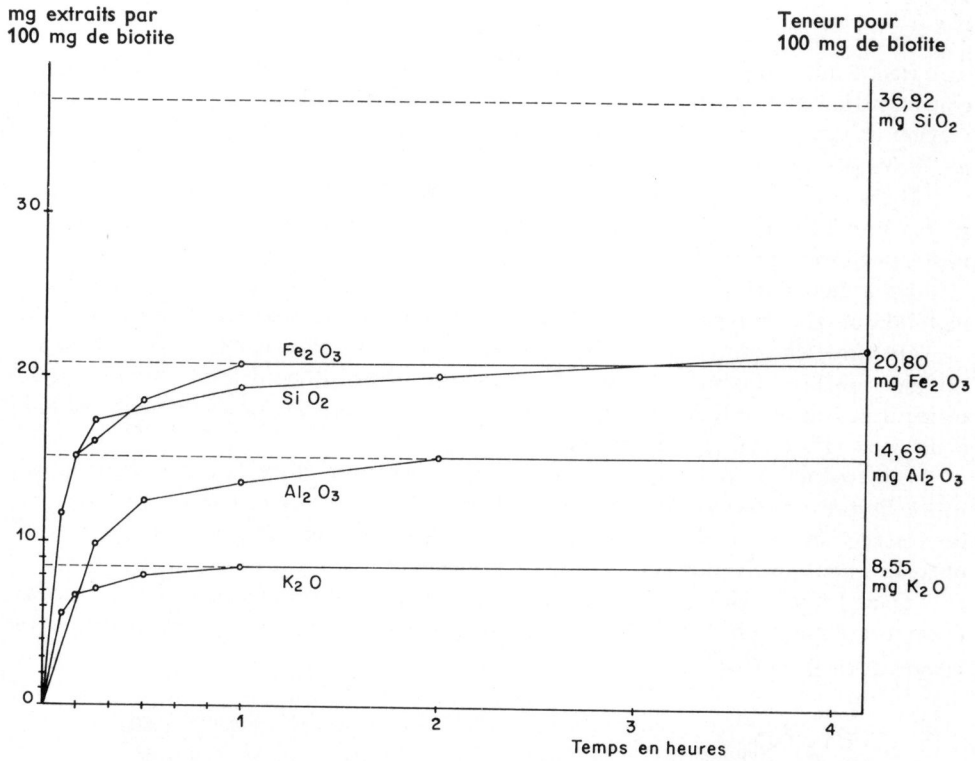



FIG. 6. — *Libération des différents éléments du réseau de la biotite en fonction du temps* (100 mg/100 ml HCl N 80°C) pH = 0

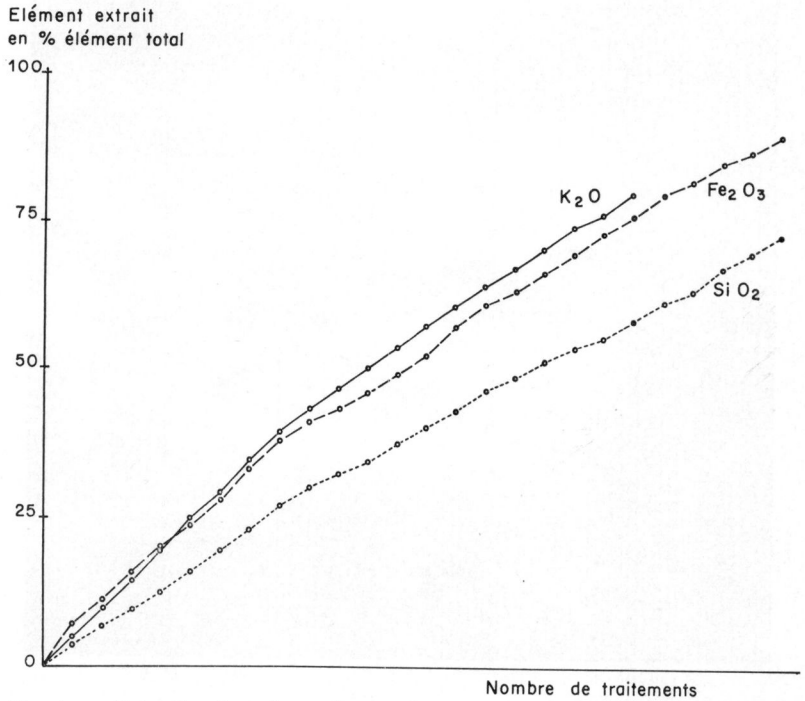



FIG. 7. — *Extraction de quelques éléments du réseau de la biotite par l'EDTA M/10*

De ce fait, une expérience a été réalisée avec le sel disodique de l'EDTA, en concentration M/10 (à pH # 4,5). Nous disposons ainsi à la fois d'une forte concentration en cations susceptibles de s'échanger contre le potassium, d'autre part d'un *anion complexant* de type chélate.

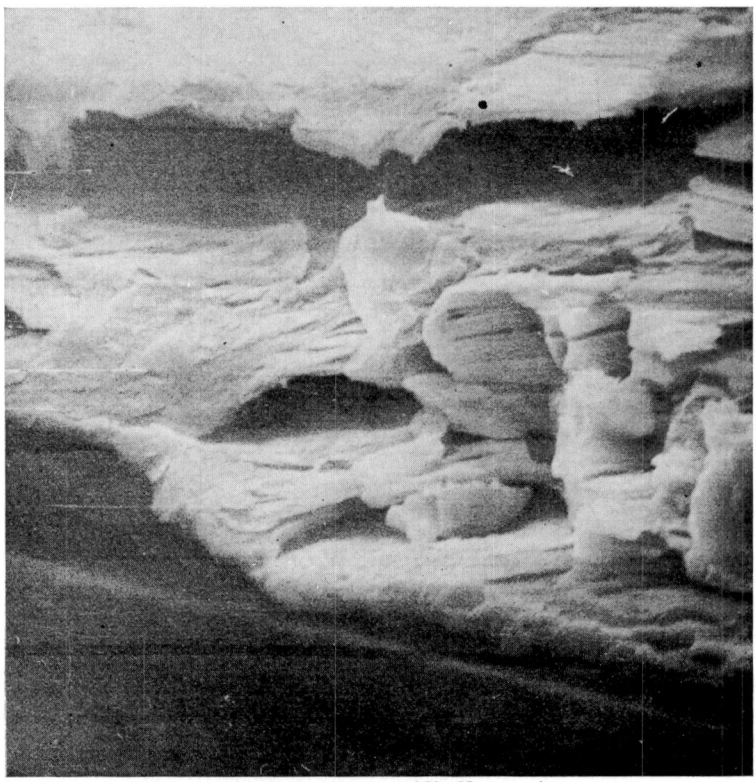
Dans la figure 7, nous donnons les résultats concernant les éléments extraits en p. 100 des éléments présents dans le minéral. En une trentaine de traitements, une mise en solution pratiquement totale du minéral a été obtenue.

En milieu EDTA N/10, nous avons pu doser $K_2O$, $SiO_2$ par le complexe silico-molybdique $\alpha$, et le fer en utilisant la couleur jaune du complexe formé avec l'EDTA.

On s'aperçoit ainsi que le fer est extrait plus vite ou sensiblement à la même vitesse que le potassium : la couche octaédrique sera donc détruite avant que le minéral ne soit ouvert. Il est à noter qu'avec l'EDTA, la silice est également extraite à un taux très élevé (230 à 280 mg/l).

L'introduction de complexes dans le milieu entraîne donc la même dynamique que celle provoquée par une forte concentration en protons en favorisant cependant la destruction de la couche octaédrique (complexes plus stables avec Fe) ; nous obtenons alors une évolution de type « podzolisante ».

Dans les sols acides, riches en composés complexants, la concentration en cations étant en général plus faible que dans ces expériences, ce déséquilibre pourra être encore plus prononcé.

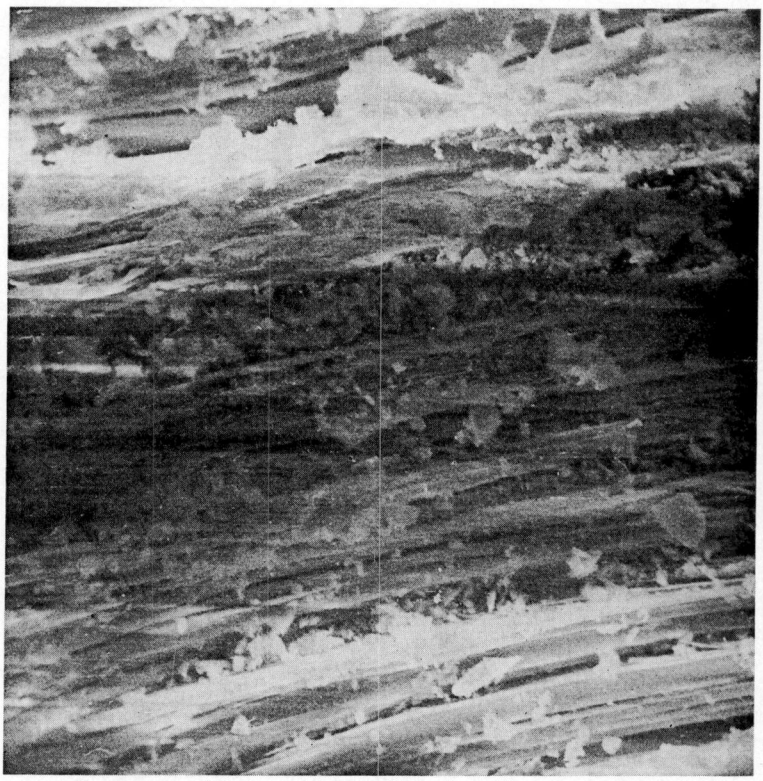


CLICHÉ 1. — *Biotite traitée par $AlCl_3$ N ;* grossissement 2 000

4. — *Aspect des micas altérés au microscope électronique*

— Les micas traités par $AlCl_3$ N présentent le même aspect que les vermiculites obtenues avec des sels neutres (ROBERT, 1971). On constate quand même un empilement un peu plus désordonné et un aspect floconneux de la surface des feuillets (cliché 1).

— Par contre, pour le mica ayant évolué en conditions très acides et dont la couche octaédrique a été détruite, on peut observer une pulvérisation et une dislocation des feuillets qui se manifestent aussi bien dans le plan (001) que dans la direction C (cliché 2).



CLICHÉ 2. — *Biotite traitée en milieu très acide ;* grossissement 620

## C. — ÉVOLUTION DES BIOTITES EN MILIEU ALCALIN

Après avoir envisagé l'évolution de la biotite en milieu acide, il était logique d'aborder la question de sa stabilité en milieu alcalin.

Pour cela, nous avons réalisé toute une série d'expériences à des pH de plus en plus élevés et à des concentrations variées, en prenant soit une base forte NaOH, soit des sels hydrolysables ($Na_2CO_3$).

1. — *Expériences à pH 9,5 en milieu riche en cations*

Elles ont porté sur la biotite de Varennes à 80°C, et le mélange tampon suivant :

$$\left.\begin{matrix} Na_2CO_3\ N \\ NaHCO_3\ N \end{matrix}\right\} \text{pH } 9{,}5$$

L'expérience a été arrêtée au bout de 12 traitements, alors que 90 p. 100 du $K_2O$ était déjà extrait. Les données des rayons X montrent une ouverture à 12 Å (vermiculite Na) et les données thermiques confirment l'évolution en vermiculite typique (capacité d'échange de 133 méq/100 g de minéral calciné).

Nous avons suivi la cinétique de libération des éléments (fig. 8). La libération de $K_2O$ est presque 100 fois plus rapide que celle des autres éléments : à ce pH avec une forte concentration en cations, il se formera donc une vermiculite dont les feuillets seront d'ailleurs peu altérés. Si on considère la libération des éléments du réseau à une autre échelle (fig. 9), nous voyons que c'est l'aluminium qui sort préférentiellement ; nous trouvons l'ordre de libération

$$K \gg Al — Mg — Si — Fe$$

(En milieu acide avec HCl à pH 2,5, nous avions l'ordre K > Fe — Mg — Si — Al.)

2. — *Expériences à pH 11 avec NaOH N/1 000 (faible concentration en cations)*

Dans ces conditions, nous trouvons l'ordre de libération K > Si — Al — Fe (fig. 10).

Cependant, du fait de la faible concentration en cations Na, l'extraction du potassium est, en pourcentage de l'élément présent dans le minéral, à peine 3 fois

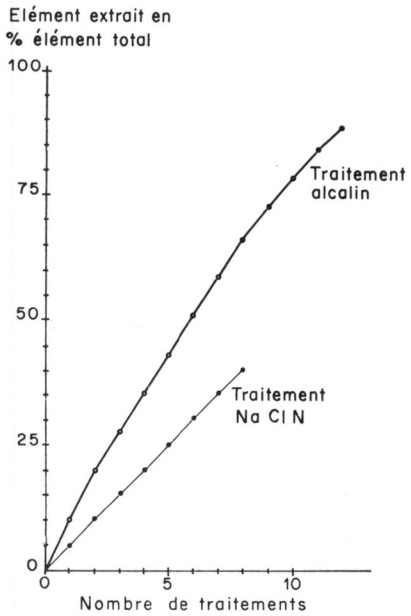



FIG. 8. — *Extraction du potassium par traitements $Na_2CO_3$ 2 N* (biotite de Varennes)

supérieure à celle de la silice. A titre de comparaison, des traitements NaCl N/1 000 à pH 5,5 provoquaient une libération de $K_2O$ sensiblement du même ordre : c'est donc essentiellement le facteur concentration en cation qui détermine la vitesse de l'évolution. L'effet du pH alcalin ne se fait pas encore beaucoup sentir sur la libération de $SiO_2$ (celle-ci n'est à pH 11 que 2 fois plus élevée qu'à pH 5,5 avec NaCl N/1000), et n'affecte pas la libération de $K_2O$.

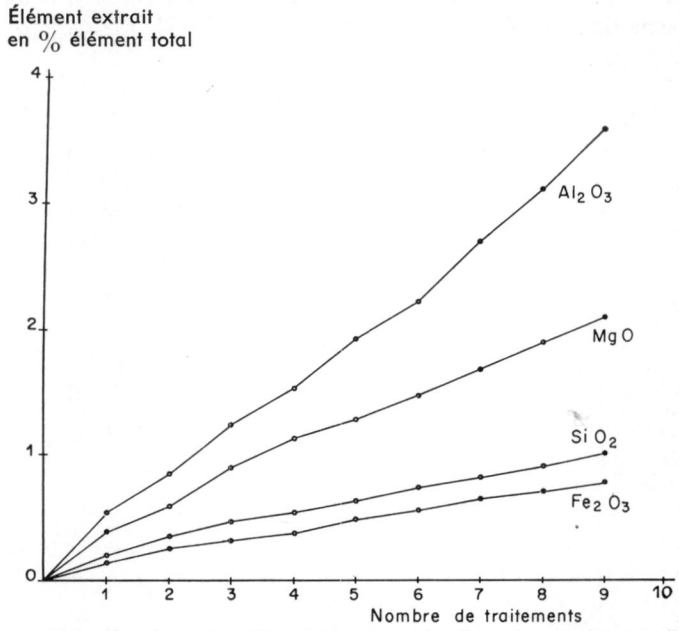



FIG. 9. — *Extraction des autres éléments du réseau par les mêmes traitements* ($Na_2CO_3$)

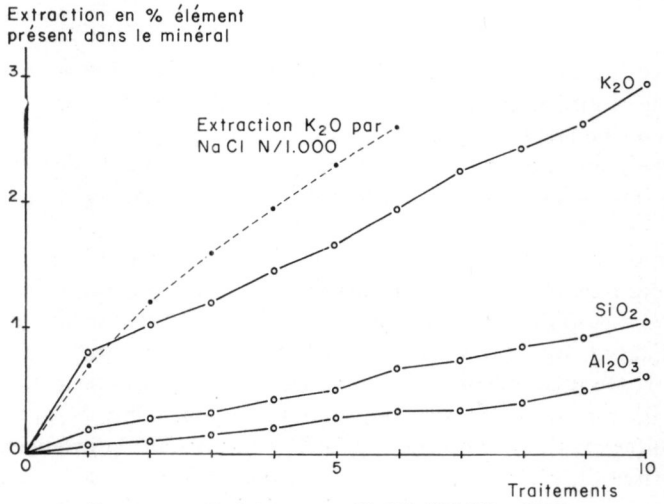



FIG. 10. — *Traitements par NaOH N/1 000, pH 11*

### 3. — *Expériences à pH 14 avec NaOH N*

Cette expérience permet d'obtenir à la fois une forte concentration en cations favorisant les réactions d'échange du K et un pH élevé susceptible de solubiliser la silice et l'aluminium.

On constate (figure 11) que le processus d'échange de cations l'emporte nettement. Ainsi 80 p. 100 du $K_2O$ a été extrait en 4 traitements. Durant le même temps, la destruction du réseau a atteint 21 p. 100 de $Al_2O_3$ ; 12,5 p. 100 de $SiO_2$ et 5 p. 100 de $Fe_2O_3$.

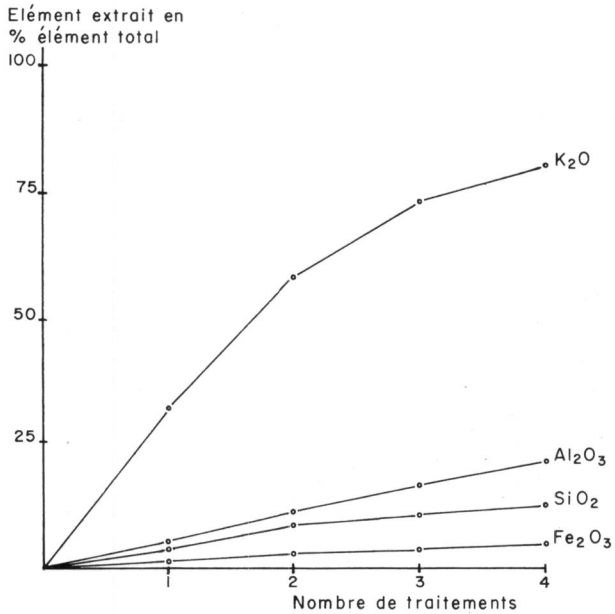


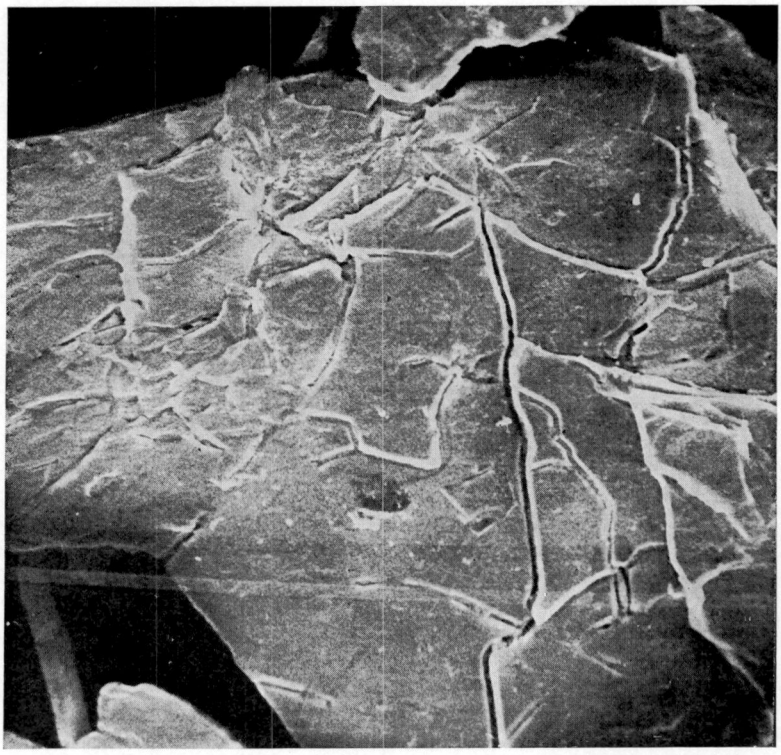

FIG. 11. — *Traitements par NaOH N, pH 14*

Donc contrairement aux conditions acides, on observe une relative stabilité des feuillets de biotite en milieu alcalin et l'attaque des feuillets lorsqu'elle se produit porte sur la couche tétraédrique.

Nous avons pu vérifier que le minéral, après traitement, s'ouvre à 12 Å (avec des ions $Na^+$ interfoliaires), et qu'il a le comportement caractéristique d'une vermiculite.

Pour éprouver encore la résistance du réseau en milieu alcalin, nous avons réalisé des expériences dans des conditions plus extrêmes par des traitements NaOH 6 N. Cette fois, la dissolution de la silice (60 p. 100 $SiO_2$ extrait) et la libération d'alumine sous forme d'aluminate (60 à 65 p. 100 d'$Al_2O_3$ extrait) sont nettement plus importantes, mais $K_2O$ au cours des mêmes traitements a été totalement extrait, ce qui permet au minéral de montrer nettement un comportement de vermiculite avant qu'il ne soit détruit. (La destruction du feuillet portera sur la couche tétraédrique). Précisons à titre de référence, que dans ces conditions (NaOH N ou NaOH 6 N) un mica dioctaédrique type muscovite ne s'ouvrirait pas, et l'on aurait ($SiO_2 > K_2O$).

Nous avons observé les biotites traitées par la soude 6 N au microscope électronique : la corrosion du feuillet se manifeste nettement, en particulier dans le plan (*a b*) (cliché 3) par l'apparition de dislocations.



Cliché 3. — *Biotite traitée par NaOH 6 N* (plan *a b*) grossissement 550

## D. — CONSÉQUENCES GÉNÉRALES. SCHÉMA DE L'ÉVOLUTION DES BIOTITES EN FONCTION DES CONDITIONS DU MILIEU

### 1. — *Évolution des biotites en fonction des conditions expérimentales*

Si l'on rassemble maintenant tous les éléments qui résultent de l'étude expérimentale, on est amené à constater l'existence de deux grands types d'altérations définis par la cinétique chimique :

— si la vitesse d'extraction du $K_2O$ est supérieure à la destruction du feuillet, on se trouve dans une zone où la trame phylliteuse se maintient pendant l'évolution ;

— si, en revanche, la vitesse de libération du $K_2O$ est inférieure à la destruction du feuillet, le réseau phylliteux se disloque complètement au cours de la décomposition.

a) *Évolution avec maintien de la trame des feuillets* (« transformation » *sensu stricto*).

C'est le cas rencontré dans la majorité des expériences que nous avons réalisées avec un renouvellement périodique des solutions (tous les 4 à 7 jours). On constate une sortie plus rapide du potassium, et son remplacement par des cations hydratables : l'évolution se caractérise donc par une *ouverture des feuillets* décelable aisément à l'aide de la diffraction des rayons X. Cependant, les modalités peuvent être très différentes. Tout d'abord *le feuillet sera plus ou moins attaqué* et certaines parties le seront plus ou moins que d'autres.

TABLEAU 3

*Processus engendrés lors de différents traitements*
*Milieu concentré en cations*

| Traitement | pH | Ouverture ($K_2O$ > autres éléments) | Attaque du feuillet | | Phénomène résultant |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Couche tétraédrique | Couche octaédrique | |
| HCl N ou complexe organique fort (EDTA) | 0 | Non | ++ | +++ | Dissolution avec résidu riche en silice |
| $AlCl_3$ N | 2,5 | Oui | + | ++ | Ouverture avec attaque couche octaédrique : vermiculite Al |
| $MgCl_2$ N | 5 à 7 | Oui | Faible | Faible | Ouverture franche *vermiculitisation sensu stricto* |
| NaCl N | | Oui | — | — | |
| $Na_2CO_3$ (2 N) | 9,5 | Oui | + | Faible | Ouverture avec légère attaque du feuillet |
| NaOH N | 14 | Oui | ++ | + | Ouverture avec attaque couche tétraédrique |

Ainsi, en milieu concentré, si l'on fait intervenir des conditions de pH très variées (tabl. 3), on note l'existence de plusieurs éventualités :

— en milieu acide, ce sera nettement la couche octaédrique la plus sensible ;

— en milieu basique où les biotites se montreront beaucoup plus stables, ce sera la couche tétraédrique qui sera la plus atteinte ;

— la zone des « vermiculites *sensu stricto* » sera située en milieu neutre (voire légèrement alcalin), en présence de solutions concentrées en cations. Dans ces conditions, l'échange total du potassium pourra se faire rapidement et d'une manière préférentielle, sans que le réseau ait le temps d'être notablement touché.

Il semble d'ailleurs que la concentration des solutions ne change pas la tendance générale à l'ouverture (tabl. 4). Mais c'est elle qui est responsable de sa *plus ou moins grande vitesse.*

TABLEAU 4

*Milieu dilué*

| Traitement | pH | Ouverture | Attaque du feuillet | | Phénomène résultant |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Couche tétraédrique | Couche octaédrique | |
| HCl N/300 | 2,5 | Oui | ++ | +++ | Ouverture avec attaque du feuillet (couche octaédrique) vermiculite Al |
| NaCl N/1 000 | ≃ 6 | Tendance | + | Faible | Tendance à l'ouverture attaque couche tétraédrique (nombreux renouvellements) |
| NaOH N/1 000 | 11 | Tendance | ++ | Faible | Tendance à l'ouverture avec attaque du feuillet (couche tétraédrique) |

Lorsque la concentration décroît, le nombre de renouvellements de la solution devra être multiplié par 100 ou par 1 000, pour obtenir la même extraction du potassium, il en résultera corrélativement une attaque des feuillets beaucoup plus considérable.

Ainsi, les micas trioctaédriques, du fait de leurs caractéristiques structurales (structure phylliteuse, présence d'hydroxyles « dressés » facilitant l'extraction du potassium) auront une évolution privilégiée vers l'ouverture et la formation de vermiculites dont les feuillets pourront être plus ou moins dégradés.

b) *Évolution avec destruction des feuillets.*

Pour renverser cette tendance à « l'ouverture des feuillets », il faudra que des conditions très agressives se développent. Ce sera le cas avec l'acidolyse, ou dans des conditions d'hydrolyse intense.

— Avec l'acidolyse intense, c'est la destruction de la couche octaédrique qui l'emporte sur la libération du potassium. Cette évolution nécessite d'après nos expériences des conditions d'acidité extrême. Mais la présence d'anions complexants (EDTA par exemple) jouera le même rôle dans la mesure où la formation de complexes se fera préférentiellement avec les cations octaédriques (Fe, Mg, Al).

— Avec l'hydrolyse intense, ce sera, par contre, la couche tétraédrique qui sera la plus atteinte (libération de silice, libération de $K_2O$). Nous avions déjà noté une tendance dans ce sens avec des pH alcalins, mais jamais la libération de silice n'arrivait à dépasser celle du $K_2O$ (en présence d'une concentration en cations assez forte). Par contre, avec l'action intense de l'eau telle qu'elle peut être réalisée en soxhlet, la destruction du feuillet deviendra suffisamment intense pour devenir le phénomène prépondérant.

TABLEAU 5

*Vitesse d'extraction relative des différents types d'éléments suivant les conditions expérimentales*

| Int ⩽ [F] Destruction du feuillet 2/1 | | Int > [F] Maintien du feuillet 2/1 (ouverture) | |
|---|---|---|---|
| Int ⩽ Oc | Int ⩽ Te | Int > Oc | Int > Te |
| HCl N<br>EDTA N/10<br>($Na_2S_2O_8$) | Eau (Soxhlet) | $AlCl_3$ N<br>HCl N/300<br>(citrate Na) | NaCl N<br>$MgCl_2$ N<br>$Na_2CO_3$ N<br>NaOH N<br>NaCl N/1 000<br>NaOH N/1 000<br>Eau (avec faible renouvellement) |

Abréviations : Int = interfoliaires (K)
Te = couche tétraédrique
Oc = couche octaédrique
} F = Feuillet

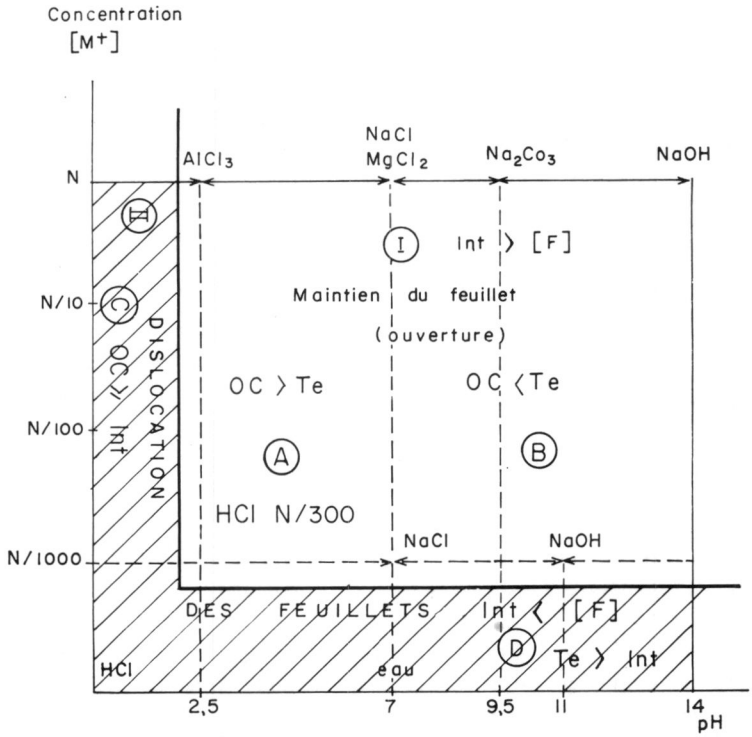



FIG. 12. — *Schéma de l'évolution des biotites en fonction des conditions expérimentales* (pH, concentration des solutions)

On peut regrouper les résultats de nos expériences dans un tableau récapitulatif (tabl. 5) et les situer sur un schéma (fig. 12).

2. — *Établissement de la séquence générale d'altération des micas biotites*

Au cours de ce premier schéma basé sur les résultats de nos expériences, nous avons accordé une place essentielle à l'évolution des couches interfoliaires des micas ; et il semble bien en effet que ce soit l'aspect le plus caractéristique de leur transformation.

Si en revanche, on considère avant tout l'évolution du feuillet lui-même, on peut se replacer plus facilement dans le cadre général de l'évolution des silicates tel qu'il a été défini par PEDRO (1966, 1968, 1969), et en préciser certains aspects (tabl. 6).

TABLEAU 6

*Schéma général des différentes voies d'évolution des biotites*

| Mécanisme d'altération | Hydrolyse (Soluviation) | | Acidocomplexolyse (Chéluviation) | |
|---|---|---|---|---|
| Stabilité relative des couches structurales | [Oc] < [Te] | | [Oc] > [Te] | |
| Taux d'extraction des éléments | Hydrolyse totale $SiO_2 \gg K_2O$ | Hydrolyse limitée $SiO_2 < K_2O$ | Acidolyse limitée [Oc] < $K_2O$ | Acidolyse caractérisée ou complexolyse [Oc] > $K_2O$ |
| | | Maintien de la carcasse 2/1 (Int > F) | | |
| Type de transformation | Dislocation complète des feuillets | Ouverture et hydratation des couches interfoliaires oxydation en couche octaédrique | Ouverture et hydroxyalumination des couches interfoliaires | Dislocation totale des feuillets |
| Caractérisation minéralogique | Gœthite Gibbsite (Kaolinite) | Vermiculite Montmorillonite | Intergrades Al Chlorite II | Silice résiduelle |
| Processus d'altération | Ferrallitisation Monosiallitisation | Bisiallitisation « apparente » | Monosiallitisation « déguisée » | Podzolisation |

a) *En milieu neutre ou alcalin*, la destruction du feuillet porte de préférence sur la couche tétraédrique. On peut alors caractériser l'évolution par la relation générale : Te > Oc.

Mais, au sein de ce domaine selon la vitesse de libération du potassium, on peut distinguer deux éventualités.

— Ou bien la vitesse d'extraction des cations interfoliaires apparaît supérieure à la destruction de la couche structurale la plus touchée (ici la couche tétraédrique Te) et l'on a : Int ⩾ Te. Dans ce cas, la trame phylliteuse sera peu altérée.

Si on se réfère aux conditions géochimiques générales (PEDRO, 1966), ceci correspond à $SiO_2$ < Bases, c'est-à-dire à des *conditions d'hydrolyse limitée* dues à un drainage ralenti et à un milieu relativement concentré en certains cations. Dans de telles conditions, les feldspaths par exemple donneraient des silicates phylliteux (zone de la siallitisation) et sans doute même des minéraux 2/1 (Bisiallitisation).

Or, comme nous partons déjà de minéraux possédant une structure phylliteuse de type 2/1, l'évolution portera essentiellement sur les couches interfoliaires ; ce sera donc la zone dite de « bisiallitisation apparente » telle qu'elle a été précisée par PAQUET, 1969 ; les micas seront transformés en vermiculites et si les remaniements en couche tétraédrique sont suffisants, on peut imaginer que l'on puisse obtenir des édifices à comportement de smectite (montmorillonite) (ISMAIL, 1969).

— La deuxième éventualité correspond, par contre, à $SiO_2 > K_2O$ et elle se trouve réalisée lorsque le drainage est intense et en présence d'un milieu très pauvre en cations (dispositif soxhlet).

Si on se replace par rapport à des données géochimiques plus générales, cette relation correspond à $SiO_2$ > Bases, qui traduit l'existence d'une hydrolyse totale qui conduirait à une désilicification totale du matériau correspondant à la ferrallitisation.

C'est effectivement la tendance que nous avons pu constater dans nos expériences en soxhlet sur muscovite ou sur phlogopite et qui s'est trouvée réalisée sur illite (PEDRO *et al.*, 1969).

b) *Si par contre, on envisage des conditions acides ou complexantes,* on se trouve au contraire dans un domaine où la sensibilité des couches composant le feuillet ne sera plus la même et l'on aura Oc > Te, car ce sont les cations octaédriques qui sont alors les plus touchés. Nous retrouvons ensuite les deux mêmes éventualités, mais comme la couche la plus labile est cette fois la couche octaédrique, ce sera elle qui servira de référence.

— Si Int ⩾ Oc, le feuillet sera simplement transformé et l'on aboutit ainsi à des édifices à 14 Å qui sont des termes de transition entre les vermiculites et les chlorites selon le taux de remplissage et l'organisation des espaces interfoliaires. Lorsque le remplissage est total, on obtient alors des chlorites secondaires (en général alumineuses) (JACKSON, 1963).

Comme celles-ci sont généralement instables et tendent à former de la kaolinite, et que géochimiquement le rapport $SiO_2/Al_2O_3$ correspond dans ce cas à un édifice 1/1, le processus peut être assimilé à une « monosiallitisation déguisée » (TARDY, 1969).

— Si Int < Oc. On aboutit à la dislocation des couches octaédriques et à la destruction des feuillets.

C'est le résultat que nous avons obtenu avec une acidolyse intense (HCl N), mais également avec un complexe organique polyvalent (EDTA). Le processus engendré correspond à la podzolisation ou chéluviation (SWINDALE et JACKSON, 1956) qui conduit au blanchiment des biotites (extraction du fer) et qui peut ne laisser subsister du minéral que des résidus riches en silice.

Un certain nombre de ces transformations que nous avons reproduites expérimentalement dans des conditions déterminées, se retrouvent effectivement dans le milieu naturel.

De ce fait, la biotite pourra être instable dans des conditions très diverses, mais qui correspondent bien aux domaines où l'attaque du feuillet prédomine :

— en milieu acide ou riche en acides organiques complexants (podzols, tourbières hautes à sphagnum...), par exemple où l'on assiste à un blanchiment complet des paillettes (GODART *et al.*, 1961) ;

— en milieu tropical aussi où l'on note sa disparition de bas en haut des profils et son remplacement par de la kaolinite et de la goethite. Citons à ce sujet parmi les travaux les plus récents ceux de LELONG et MILLOT (1966), LELONG (1967) et TARDY, (1969).

En dehors de ces milieux à conditions particulièrement agressives, l'évolution sera plus complexe à saisir car elle se fera par simple transformation graduelle des feuillets.

En milieu neutre ou alcalin, les micas donneront en général des vermiculites ou des montmorillonites selon l'intensité du drainage, et les remaniements susceptibles d'intervenir en couche tétraédrique (GLENN et JACKSON, 1960 ; PAQUET, 1969).

Par contre, dès que le milieu deviendra plus acide, on rencontrera très fréquemment une évolution vers des intergrades, c'est-à-dire des édifices 2/1 contenant de l'aluminium plus ou moins polymérisé entre les feuillets.

De nombreux exemples ont été ainsi donnés pour les sols acides de quelques régions froides : en Écosse (WILSON, 1967) ou dans les Vosges (GAC, 1968), mais également dans des régions où alternent des saisons froides et des saisons tropicales (KATO, 1964).

Plus récemment d'ailleurs, de tels intergrades ont été retrouvés dans une arène profonde développée dans le Morvan Sud (SEDDOH *et al.*, 1969).

Il semble donc que de tels minéraux, qui représentent des termes de transition vers les chlorites secondaires puissent avoir une extension géographique considérable.

## CONCLUSION

Nous avons défini (ROBERT, 1970) ce que l'on peut dénommer la « vermiculitisation *sensu stricto* », comme une transformation qui porte préférentiellement sur la couche interfoliaire avec remplacement du potassium par des cations basiques hydratables (Na, Ca, Mg), mais qui affecte peu la carcasse silicatée.

Nous avons pu montrer qu'au cours de cette évolution vermiculitisante, se superposaient 2 phénomènes distincts, confondus jusqu'à maintenant :

— une *ouverture* des feuillets, phénomène apparemment réversible par refixation du potassium, qui n'affecte pas l'équilibre électrique de la maille ;

— une *oxydation* du fer ferreux de la couche octaédrique, « véritable phénomène parasite », qui ne peut s'effectuer qu'en cours d'ouverture ou après l'ouverture, et qui viendra modifier profondément la structure octaédrique ou la constitution hydroxylique (par départ de protons ou sortie de cations octaédriques).

On pouvait penser qu'une telle évolution vermiculitisante ainsi définie était un phénomène limité à des conditions assez restreintes. En réalité, en faisant varier largement les conditions expérimentales nous avons pu montrer que le domaine de vermiculitisation des micas était très étendu.

Il suffit par exemple d'envisager un drainage par des eaux ayant des concentrations voisines de N/1 000 en Ca, Mg ou Al (quelques mg/l), et donc relativement fréquentes dans le milieu naturel, pour que se trouve réalisée une extraction préférentielle du potassium et par voie de conséquence une ouverture des feuillets micacés.

Mais, dans ces conditions, la transformation ne sera plus alors aussi sélective que celle que nous avons définie au départ. Ainsi, en milieu neutre ou alcalin dès que le drainage des solutions sera plus intense, la vermiculitisation s'accompagnera d'une dégradation des couches tétraédriques.

En revanche, dès que le pH sera plus acide ou les solutions plus riches en composés organiques, ce sera la couche octaédrique qui sera attaquée.

*La majorité des vermiculites* rencontrées dans le milieu naturel seront donc des minéraux ouverts, mais *dont le feuillet sera toujours plus ou moins dégradé.*

L'existence de solutions plus diluées et la présence de chemins préférentiels pour le drainage pourra rendre également l'extraction du potassium et l'ouverture qui en découle plus ou moins incomplète : il en résultera la formation d'édifices interstratifiés biotite-vermiculite.

Toutes les études détaillées que nous avons entreprises, ont porté sur des micas trioctaédriques typiques. Le comportement d'autres types de micas a permis de constater des différences liées à leur composition cristallochimique.

Ainsi, l'aptitude à l'ouverture apparaît sous la dépendance directe de la couche hydroxylique et de la teneur en fluor. Comme le pensait BASSETT, l'ouverture sera d'autant plus facile que le nombre des hydroxyles perpendiculaires au plan du feuillet sera élevé (ils exercent un effet de répulsion sur le potassium). Tout ce qui tendra à faire diminuer le nombre d'hydroxyles dressés, diminuera l'aptitude à libérer le potassium : ce sera particulièrement le cas de l'oxydation, qu'elle soit obtenue par voie thermique ou par voie chimique.

Cette action permet ainsi de justifier le comportement des micas dioctaédriques, où les hydroxyles inclinés sur le feuillet, n'exerceront plus leur action répulsive sur le potassium interfoliaire.

Cette liaison plus forte du potassium au réseau que l'on retrouve aussi bien dans les micas trioctaédriques oxydés ou contenant du fluor, que dans les minéraux dioctaédriques (muscovite, illite), aura d'ailleurs des répercussions sur l'évolution générale de ces minéraux. Par exemple, l'évolution des muscovites sera beaucoup plus sensible à de faibles teneurs en K présentes dans les solutions du milieu, et leur comportement vis-à-vis de l'altération pourra rejoindre alors celui des tectosilicates potassiques.

A ce niveau d'ailleurs, des corrélations peuvent être encore établies avec la première partie de notre travail : en effet, à l'aide de ces études complémentaires sur micas, la résistance à la désagrégation des roches contenant des minéraux phylliteux dioctaédriques, se trouve expliquée, puisque ces minéraux n'évoluent pas dans les diverses conditions que nous avons étudiées. Les mécanismes élémentaires permettent ainsi d'interpréter l'ensemble du processus évolutif allant de la dégradation de la roche initiale, jusqu'à la modification des espèces argileuses qui en résulte.

*Reçu pour publication en octobre 1970.*

## REMERCIEMENTS

Si ce travail a pu être mené à bien, c'est avec la complaisance et l'aide de nombreuses personnes, et j'aimerais leur assurer toute ma gratitude.

Je remercie tout d'abord M. le Professeur L. GLANGEAUD, membre de l'Institut, qui après avoir contribué à ma formation au cours du 3e cycle de Géodynamique externe, a bien voulu par la suite, me faire l'honneur d'être mon directeur de thèse.

Je remercie aussi M. le Professeur J. WYART, membre de l'Institut, dont j'avais pu suivre l'enseignement de minéralogie et de cristallographie, pour avoir bien voulu accepter la présidence du jury.

Que M. S. HÉNIN, chef du département d'Agronomie, qui orienta mes premières recherches, contribua à ma formation, et qui malgré l'augmentation de ses charges, continua néanmoins à suivre ce travail, trouve ici l'expression de toute ma profonde gratitude.

Auprès de M. G. PEDRO, maître de recherches à l'I. N. R. A., j'ai trouvé au cours du déroulement de ce travail, une aide et une disponibilité de tous les instants, aussi je profite de cette occasion qui m'est offerte pour lui exprimer mon attachement sincère.

M. R. BÉTRÉMIEUX a su établir au sein du Laboratoire des Sols dont il est le directeur, de bonnes conditions matérielles et intellectuelles ; l'amitié et la coopération qui règnent entre tous ses membres ont contribué également à l'établissement de cette atmosphère favorable aux recherches. Je leur adresse mes vifs remerciements.

Je suis reconnaissant à tous ceux qui par leurs suggestions ou leurs critiques ont pu influencer mes recherches et je pense à M. J. MERING, M. J-J. FRIPIAT, M. G. MILLOT et Mlle S. CAILLÈRE.

De même, de nombreuses collaborations scientifiques se sont développées au cours de ces années de recherches, tout d'abord avec M. J. CHAUSSIDON et M. R. PROST au sein du département d'Agronomie, mais également avec des chercheurs appartenant à d'autres organismes, en particulier M. R. ROUXHET du Laboratoire de Chimie minérale de Louvain, ou M. F. K.SEDDOH du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Dijon ; je citerai également mon ancien professeur M. CHARLES qui avec M. D. COLLIER et M. J. DEJOU, ont facilité mes tournées dans les régions granitiques. Je les remercie tous de l'aide qu'ils ont bien voulu m'apporter.

Une thèse exige un gros travail technique où sont surtout intervenus M. G. VENEAU et M. D. TESSIER. Elle suppose également de nombreuses collaborations pour sa réalisation matérielle ; de ce travail Mme T. DIMEY a eu la grosse part, mais il a fallu faire appel à de multiples bonnes volontés au sein du département d'Agronomie ou dans de nombreux autres services. Que tout le monde en soit ici remercié.

Ce travail a été entièrement réalisé dans un laboratoire de la Recherche agronomique, aussi je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à M. le Directeur général J. BUSTARRET et à M. l'Inspecteur général G. DROUINEAU.

## SUMMARY

### TENTATIVE SURVEY OF THE EVOLUTION OF BIOTITES
### II. — THE OTHER EVOLUTION POSSIBILITIES OF MICAS AND THEIR RELATIONSHIP WITH RESPECT TO VERMICULITIZATION

In the course of this work, the results derived from many experiments during which the pH was made to vary from 0 to 14, as were also the nature and concentration of cations and the nature of the anion (either complexing or not), are presented and discussed.

Taking as basis the relative rate at which the various elements of the biotite lattices were freed under varied conditions, allows working out the evolution pattern of these minerals.

Such a pattern covers all the conditions that may occur in the natural environment and enables to characterize the various evolution processes resulting therefrom.

## ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTALE UNTERSUCHUNG DER EVOLUTION DER GLIMMER (BIOTITE)

II. — DIE ANDEREN EVOLUTIONSMÖGLICHKEITEN DER GLIMMER UND IHRE STELLUNG IM VERHÄLTNIS ZUR VERMIKULITBILDUNG

Im Laufe dieser Studie werden die Ergebnisse zahlreicher Versuche, wobei Veränderungen des pH (o bis zu 14), der Natur und der Konzentration der Kationen ubd der Natur der Anionen (komplexbildende oder nicht komplexbildende) vorgenommen wurden, aufgeführt und diskutiert.

Unter Zugrundelegung der relativen Freimachungsgeschwindigkeit der verschiedenen Elemente des Netzes der so unterschiedlich behandelten Biotite, ist es möglich, ein Evolutions-Schema dieser Mineralien aufzustellen.

Dieses Schema umfasst die gesamten Verhältnisse, die in dem natürlichen Milieu auftreten können und erlaubt die von ihnen beeinflussten, verschiedenen Evolutionsvorgänge zu bastimmen.

## РЕЗЮМЕ

*Экспериментальное изучение эволюции слюд (биотитов).*

II. Иные возможности эволюции слюд и их место по отношению к вермикулитизации.

М. РОБЕР.

В данной работе представлены и разбираются результаты многочисленных опытов, в которых менялись кислотность (pH от 0 до 14), природа и концентрация катионов, а также и природа аниона (комплексирующий, или не комплексирующий).

Основываясь на относительной быстроте освобождения различных элементов сети биотитов, поставленных в совершенно разные условия, становится возможным набросать схему эволюции этих минералов.

Схема эта покрывает всю совокупность условий могущих встретиться в природной среде, и позволяет также определить различия процессов эволюции, вытекающие из этих условий.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARVIEU J.-C., CHAUSSIDON J., 1964. Étude de la solubilisation acide d'une illite : extraction du potassium et évolution du résidu. *Ann. agron.*, **15**, 207-229.

GAC Y., 1968. *Les altérations de quelques roches cristallines des Vosges. Étude minéralogique et géochimique.* Thèse 3e cycle, Strasbourg, 77 p.

GASTUCHE M. C., 1963. Kinetics of acid dissolution of biotite. *Int. Clay Conf.*, Stockholm, Vol. I., 67-83.

GLAESER R., MANTIN I., MERING J., 1960. Études sur l'acidité de la montmorillonite, *21 rst. Congr. int. Geol.*, Copenhague, **24**, 28-34.

GLENN R. C., JACKSON M. L., HOLE F. D., LEE G. B., 1960. Chemical weathering of layer silicate clays in loess-derived Tama silt loam of southern Wisconsin. *Clays and clay Min.* (*8th Nat. Conf.*) 63-83.

GODDART A., PAQUET H., MILLOT G., 1961. Contribution à l'étude de quelques paléosols du Nord de l'Écosse. *Bull. Serv. Carte Géol. Als.-Lor.*, **14**, 111-128.

ISMAIL F. T., 1969. Role of ferrous oxydation in the alteration of biotite and its effect on the type of clay minerals formed in soils of arid and humid regions. *Am. Min.*, **54**, 1460-1466.

JACKSON M. L., 1963. Interlayering of expansible layer silicates in soils by chemical weathering. *Clays and clay Min.* (*11th Nat. Conf.*), 29-36.

KATO Y., 1965. Mineralogical study of weathering products to granodiorite at Shinskiro city. V. Trioctahedral aluminium vermiculite as a weathering product of biotite. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **11**, 3, 16-24.

LELONG F. MILLOT G., 1966. Sur l'origine des minéraux micacés des altérations latéritiques. Diagenèse régressive. Minéraux en transit. *Bull. Serv. Cart. Géol. Als.-Lor.*, **19**, 3-4, 271-287.

LELONG F., 1967. *Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide* (*Guyane française*). Thèse Fac. Sc. Nancy, 187 p.

MEHMEL M., 1938. Ab und Umbau am Biotit. *Chem. der Erde*, 307-332.

PAQUET H., 1969. *Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées.* Thèse Fac. Sci., Strasbourg, 346 p.

PEDRO G., 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles. *C. R. Ac. Sc.*, 262 D, 1828-1831.

PEDRO G., 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe ; présentation d'une esquisse géographique. *Revue géog. Phys. Géol. Dyn.*, Paris, **10**, 457-470.

PEDRO G., JAMAGNE M., BÉGON J.-C., 1969. Mineral interactions and transformations in relation to pedogenesis during the Quaternary. *Soil Sc.*, **107**, 6, 462-469.

PEDRO G., BERRIER J., TESSIER D., 1969. Recherches expérimentales sur l'altération « allitique » des argiles dioctaédriques de type kaolinite et illite. *Bull. Gr. Fr. Argiles* (sous presse).

ROBERT M., 1968. Étude expérimentale sur les processus de vermiculitisation des micas trioctaédriques ; bilan de l'évolution et conditions de genèse des vermiculites. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **20**, 153-171.

ROBERT M., 1971. Étude expérimentale de l'évolution des micas (Biotite). I. Les aspects du processus de vermiculitisation. *Ann. agron.*, **1**, 43-93.

SEDDOH F. K., PEDRO G., ROBERT M., DEJOU J., 1969. Sur l'évolution des biotites et la formation d'intergrades à 14 Å dans les arènes granitiques de Tazilly (Massif de Luzy, Morvan méridional). *C. R. Ac. Sc.*, **268**, 1901-1904.

SWINDALE L. D., JACKSON M. L., 1956. Genetic processes in some residual podzolized soils of New Zealand. *6e cong. Int. Sc. Sol.*, Paris, E, 233-239.

TAMURA T., 1957. Identification of tho 14 Å Clay mineral component. *Am. Min.*, **42**, 107-110.

TARDY Y., 1968. *Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique.* Thèse Fac. Sc. Strasbourg, 274 p.

WILSON J., 1967. The clay mineralogy of some soils derived from a biotite rich quartz gabbro in the Strathdon area Aberdeenshire. *Clay. Min.*, **7**, 91.

---

## ANNEXE

### MÉTHODES DE DOSAGES CHIMIQUES

Une série de méthodes classiques ont été utilisées qu'il n'est pas possible ici de citer en détails.

On peut se référer à :

M. ROBERT, J. BERRIER, G. PEDRO (1968). *Méthode d'analyse des silicates par voie humide*, Première approximation (publication à tirage limité).

M. L. JACKSON (1968). *Soil chemical analysis*. Prentice Hall, Inc.

J. A. MAXWELL (1968). *Rock and mineral analysis*. Interscience publishers.

1. — *Analyse des éléments totaux des minéraux et des roches.*

— Fusion alcaline avec $CO_3Na_2$ — reprise par HCl.

$SiO_2$ : gravimétrie (insolubilisation en milieu HCl et élimination par HF).

Somme des hydroxydes (Al, Fe, Ti) + $P_2O_5$ : précipitation par $NH_4OH$.

Somme Ca + Mg (+ Mn) : précipitation par le phosphate de sodium en milieu $NH_4OH$.

Ti : colorimétrie par $H_2O_2$.

Mn : colorimétrie (oxydation par le periodate de Na).

— Attaque HF + $HClO_4$ sur 100 mg de produit en capsule de platine — reprise par HCl.

Na, K : photométrie de flamme (appareil Eppendorf).

Ca : photométrie de flamme en milieu oxine.

Mg : colorimétrie au jaune titane (ou jaune thiazol).

Fer total : colorimétrie à l'orthophénantroline.

— Fer ferreux sur une attaque HF + $H_2SO_4$, dosage en milieu acide borique, volumétrie par $K_2Cr_2O_7$ en présence de diphénylamine sulfonate de baryum.

— $P_2O_5$ total sur une fusion $Na_2CO_3$ reprise à l'eau — élimination de $SiO_2$ (en milieu HCl), dosage colorimétrique avec le phosphovanadomolybdate.

— Fluor : fusion avec le mélange $Na_2CO_3$ + ZnO, reprise à l'eau séparation à l'état de $H_2SiF_6$ (en milieu $HClO_4$), entraînement par la vapeur et dosage volumétrique par le nitrate de thorium (en présence d'alizarine sulfonate de sodium).

2. — *Analyse des éléments libérés au cours des traitements.*

Les dosages de Fe, Mg, Ti restent les mêmes. K est dosé au photomètre en réalisant des gammes avec les solutions de traitements (HCl, NaCl, $MgCl_2$, NaOH).

Si : colorimétrie — complexe silicomolybdique réduit à pH 3,5 (certains dosages ont été faits par le complexe jaune).

Al : colorimétrie à l'ériochrome cyanine.

## APPAREILS UTILISÉS

1. — *Diffraction des rayons X.*

— Appareil à tube démontable Beaudouin (chambres avec dispositif Seemann-Bohlin en transmission).

— Diffractomètre Rigaku type biplane (cat nº 2001) avec enregistrement.

— Diffractomètre Philips — type 1050.

2. — *Analyses thermiques.*

— Analyse thermopondérale : appareil Adamel modèle TH 59 avec enregistreur Meci (four à 1 000ºC et 1 500ºC), vitesse de chauffe 150º/h.

— Analyse thermique différentielle, appareil Adamel type ATD 63 avec enregistreur Meci, four à 1 000ºC, vitesse de chauffe 600º/h.

3. — *Spectroscopie infrarouge.*

Appareil Beckman IR 7

Appareil Beckman IR 12

4. — *Microscopie.*

— Microscope optique Leitz type Dialux Pol. MF avec dispositif photographique Orthomat.

— Microscope électronique à balayage stéréoscan (Cambridge) (appareil du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Dijon).

5. — *Mesure de densité.*

Voluménomètre J. Amsler avec utilisation de mercure.
Pycnomètre Beckman à air (modèle 930).

*Ann. agron.*, 1971, **22** (2), 183-195.

# ÉTUDE EN CASES LYSIMÉTRIQUES DE L'INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU SOL SUR LE RENDEMENT DES CULTURES

G. MONNIER

*Laboratoire des Sols,*
*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

L'influence de la profondeur du sol sur la production de différentes cultures a été étudiée à Versailles en cases lysimétriques sur une période de 14 ans.

Le classement des cultures suivant leur réaction à la profondeur du sol correspond en première approximation à celui qui découlerait de leur période et durée de végétation.

Une meilleure prévision du comportement est toutefois obtenue en tenant compte de l'interaction année × culture concrétisée par le déficit climatique en eau évalué pour chaque année au cours de la végétation de la culture considérée.

La comparaison de ce déficit avec les réserves en eau utile disponibles aux différentes profondeurs en expérimentation permet d'améliorer le classement précédent et d'attribuer aux conditions d'alimentation hydrique de la plante l'influence de la profondeur du sol sur le rendement. Une étude plus particulière des composantes de rendement d'un maïs grain confirme cette conclusion et précise l'importance des dates d'apparition du déficit en eau compte-tenu de la réserve du sol.

## INTRODUCTION

L'influence de la profondeur du sol exploitable par les racines sur le rendement des cultures a été souvent mise en évidence (in S. HÉNIN, R. GRAS, G. MONNIER, 1969).

On constate, toutefois, que le volume ou la nature (grains ou matière sèche totale dans le cas des céréales par exemple) des différences de production enregistrées sont très variables suivant l'année et (ou) la culture considérées, sans que, le plus souvent, il soit possible de déterminer parmi les conditions climatiques propres à l'année, les caractéristiques de la culture (profondeur d'enracinement, période et durée de végétation... etc.), du sol ou les interactions pouvant exister entre ces trois groupes de facteurs, celles qui sont les principaux responsables de ces variations.

Nous avons utilisé les résultats obtenus de 1956 à 1969 sur la batterie des cases lysimétriques du C. N. R. A. à Versailles, pour chercher à préciser ces variations, et si possible en déterminer la ou les raisons principales. Une installation lysimétrique se prête en effet particulièrement à ce genre d'étude, et cela pour plusieurs raisons.

— Tout d'abord, il est possible de disposer de sols de plusieurs profondeurs constitués d'un matériau homogène à l'intérieur de chaque profil et d'un profil à l'autre. Ces conditions sont rarement rencontrées dans le milieu naturel où la notion de profondeur de sol est beaucoup plus complexe.

— En second lieu, l'enregistrement des quantités d'eau de drainage permet une évaluation des évapotranspirations réelles. L'étude de l'influence de l'économie de l'eau sur les rendements, influence que la plupart des auteurs considèrent comme déterminante dans les régions à déficit climatique saisonnier, en est facilitée.

## MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Il est composé de 20 cases de 2 m² de surface et de profondeurs variables :

50 cm : cases 3 et 4
100 cm : cases 5 et 6
150 cm : cases 7 à 20

Parmi les cases de 1,50 m de profondeur, deux (nos 9 et 10) ont un drainage limité à 50 cm de profondeur — c'est-à-dire que l'excès d'eau n'est éliminé que lorsqu'un plan d'eau s'est formé et qu'il est monté jusqu'à 50 cm de la surface du sol ; deux autres (nos 13 et 14) ont un drainage limité à 100 cm. Les autres sont normalement drainées au fond de la case. Nous nous occuperons principalement ici des cases dont le drainage est librement assuré.

Pour chaque profondeur, une case sur deux est cultivée depuis 1956, l'autre étant maintenue parfaitement propre par désherbage manuel fréquent.

Enfin, le matériau de remplissage a été prélevé dans l'horizon B textural d'un sol de limon dans la région de Versailles ; ses caractéristiques de constitution physique sont indiquées dans le tableau 1. Le remplissage a eu lieu en jetant la terre dans de l'eau, de façon à assurer une mise en place régulière. Dans ces conditions, la densité apparente mesurée en 1958, le sol étant à la capacité au champ, a une valeur moyenne de 1,4, restée inchangée depuis cette date, comme l'atteste la constance de la cote de la surface du sol à la sortie de l'hiver au long des 14 années d'observations.

TABLEAU I

*Caractéristiques du sol utilisé*

| Composition granulométrique p. 100 | Horizon B (cases lysimétriques) |
|---|---|
| Argile < 2 μ | 28,50 |
| Limon 2-20 μ | 24,00 |
| Limon 20-50 μ | 44,30 |
| Sable fin 50-200 μ | 1,50 |
| Sable grossier 0,2-2 mm | 0,50 |
| Matières organiques | 0,70 |
| Carbone p. 1 000 | 4,04 |
| Azote p. 1 000 | 0,46 |
| C/N | 8,8 |
| pH | 6,40 |

Sur ces bases et compte tenu des caractéristiques hydriques de l'horizon B (capacité au champ appréciée soit en place, soit par ressuyage à pF 3 = 26 p. 100 ; point de flétrissement (pF 4,2 = 11 p. 100)), on peut calculer la réserve en eau utile totale pour chaque profondeur :

Profondeur 50 cm : 105 mm
— 100 cm : 210 mm
— 150 cm : 315 mm

En définitive, le dispositif peut être résumé de la façon suivante :

TABLEAU 2

*Dispositif expérimental* (récapitulation)

I. — *Profondeur du sol : 50 cm — Réserve utile : 105 mm*

Culture : case n° 3 (1956-1969)
Sol nu : case n° 4 (1956-1969)

II. — *Profondeur du sol : 100 cm — Réserve utile : 210 mm*

Culture : case n° 6 (1956-1969)
Sol nu : case n° 5 (1956-1969)

III. — *Profondeur du sol : 150 cm — Réserve utile : 315 mm*

1° *Drainage libre*

Culture (1) :
- 1956-1961 : cases n° 7, 11, 15, 18, 19
- 1962-1965 : cases n° 11,19
- 1966-1968 : cases n° 7, 11, 15, 18, 19
- 1966-1968 : cases n° 7, 11, 15, 18, 19
- 1969 : cases n° 11, 19

Sol nu (2) (1956-1969) : cases n° 8, 12, 17

2° *Drainage à 50 cm*

Culture (1) : case n° 10 (1956-1961 et 1966-1968)
Sol nu : case n° 9 (1956-1969)

3° *Drainage à 100 cm*

Culture : case n° 14 (1956-1969)
Sol nu : case n° 13 (1956-1969)

(1) Les cases cultivées mentionnées ici pour chaque période correspondent à celles qui portaient alors la même culture que les cases de profondeur plus faibles ; un certain nombre des cases de 150 cm de profondeur étant cultivées en prairies à certains stades de la rotation.

(2) Les cases nues n°s 16 et 20 n'ont pas été retenues parce qu'elles ont été utilisées à partir de 1959 pour une expérience de couverture du sol et de binage.

Il apparaît qu'une difficulté pourrait provenir de l'absence de répétitions sur les cases de profondeur 50 cm et 100 cm. Nous verrons que compte tenu d'une part, des écarts considérables d'une profondeur à l'autre et d'autre part, de l'homogénéité du comportement des cases semblables existant à plusieurs exemplaires, cet inconvénient est de peu d'importance pratique au niveau de précision souhaitée.

La succession des cultures en essai depuis le début de l'expérience a été la suivante :

| | |
|---|---|
| 1956 à 1959 | Luzerne |
| 1960 | Blé d'hiver |
| 1961 | Orge de printemps |
| 1962 | Maïs grain |
| 1963 | Maïs fourrage (récolté au stade grain pâteux) |
| 1964 à 1965 | Jachère nue |
| 1966 | Maïs fourrage (récolté au stade floraison) |
| 1967 | Blé d'hiver + engrais vert en culture dérobée |
| 1968 | Orge de printemps |
| 1969 | Betterave à sucre |

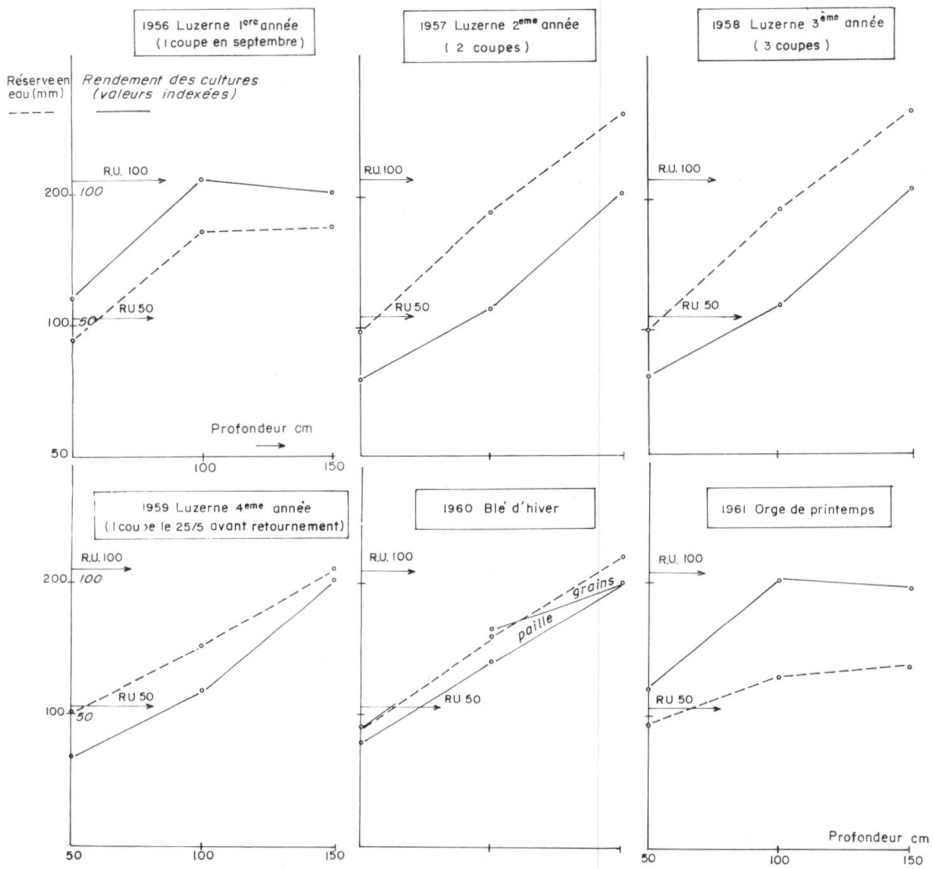



FIG. 1. — *Variation des rendements* (valeurs indexées) *et des emprunts à la réserve en fonction de la profondeur du sol*

R. U. = Réserve utile

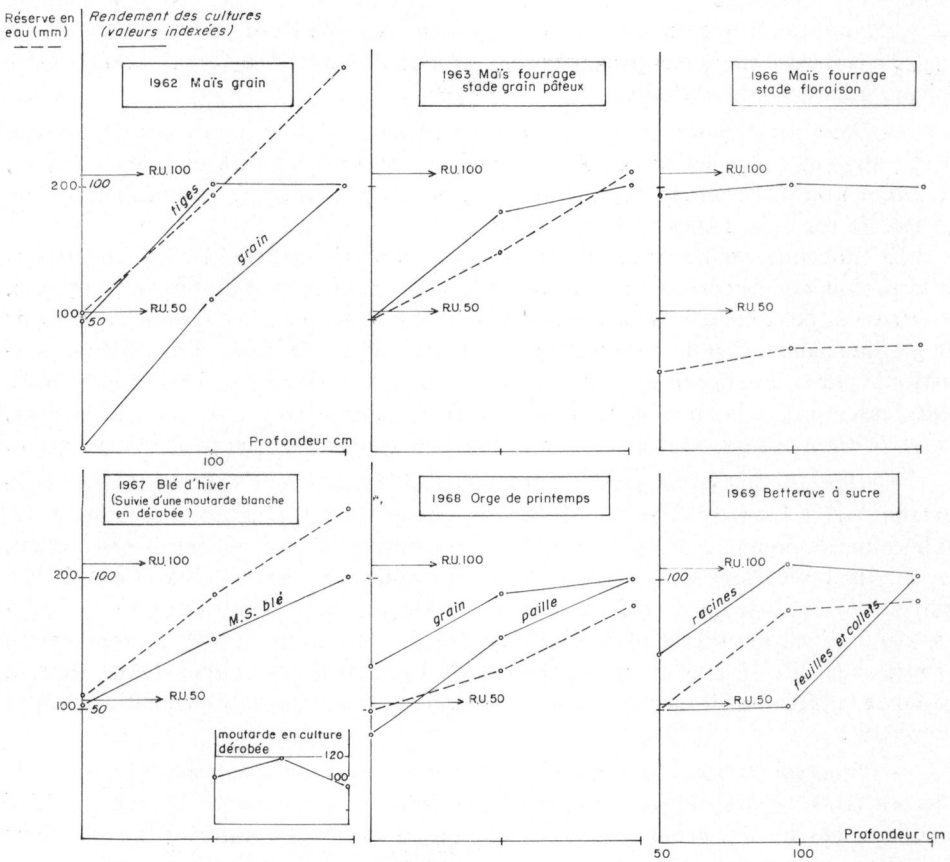

Réserve en eau (mm)
Rendement des cultures (valeurs indexées)
1962 Maïs grain
R.U. 100
200
100
tiges
grain
R.U. 50
100
50
Profondeur cm
100
1963 Maïs fourrage stade grain pâteux
R.U. 100
R.U. 50
1966 Maïs fourrage stade floraison
R.U. 100
R.U. 50
1967 Blé d'hiver (Suivie d'une moutarde blanche en dérobée)
R.U. 100
200
100
M.S. blé
R.U. 50
100
50
moutarde en culture dérobée
120
100
1968 Orge de printemps
R.U. 100
grain
paille
R.U. 50
1969 Betterave à sucre
R.U. 100
100
racines
feuilles et collets
R.U. 50
Profondeur cm
50
100

FIG. 1. — *(suite)*

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les productions obtenues pour les cultures successives figurent (courbes en traits continus) sur la série de graphiques qui constituent la figure 1. Pour les cases de 150 cm, il s'agit de valeurs moyennes. Les données recueillies concernent tantôt le rendement en grain sec, tantôt la production de matière sèche ou de matière verte totale. Elles sont exprimées en valeurs indexées, l'indice 100 représentant dans chaque cas la récolte des cases de 150 cm de profondeur.

On constate que 3 cas principaux se présentent suivant la combinaison année-culture à laquelle on a affaire.

— *Dans un premier groupe* qui comprend les 2e, 3e et 4e années de luzerne (1957, 1958 et 1959), les deux blés d'hiver (1960 et 1967) et surtout le maïs (1962), la production s'accroît de façon sensible pour chaque tranche supplémentaire de 50 cm de sol à la disposition des racines.

En moyenne, pour ce groupe, il y a presque proportionnalité entre les rendements et la profondeur de sol : si 100 représente le rendement moyen des cases de 150 cm, les cases de 100 cm fournissent un rendement de 67 et les cases de 50 cm un rendement de 38. La signification de ces variations peut être appréciée, faute d'une critique statistique, par comparaison avec la variation maxima observée des rendements entre deux cases profondes homologues, qui est de l'ordre de 10 p. 100 pour la luzerne, de 15 p. 100 pour les céréales et le maïs fourrage et de 20 p. 100 pour le maïs grain.

— *Dans un deuxième groupe* qui comprend le maïs fourrage récolté au stade pâteux (1963), les deux orges de printemps (1961 et 1968), la betterave à sucre (1969) et la coupe de première année de luzerne, on constate un accroissement de production, lorsque la profondeur du sol passe de 50 cm (indice moyen 62) à 100 cm (indice moyen 99), mais le gain devient négligeable lorsque la profondeur passe de 100 à 150 cm (indice 100). Il faut toutefois noter que cette tendance vérifiée pour la récolte proprement dite (grains d'orge et pivots de betteraves) est moins nette pour la paille de la céréale et les feuilles et collets de betteraves qui se rapprochent du groupe précédent.

— *Dans un troisième groupe* enfin, on trouve le maïs fourrage récolté à un stade précoce (1966) et les parties aériennes de l'engrais vert (moutarde blanche) cultivé « en dérobée » derrière le blé de 1967. Pour ces productions et ces années, la profondeur du sol n'a eu aucune influence.

On peut constater que la répartition des différents types de culture entre les 3 groupes suit de façon générale une certaine logique, et semble, plus précisément, liée à la durée de végétation. Toutefois, on note deux exceptions à cette tendance : la luzerne de 4e année (1959) qui n'a subi qu'une coupe en mai avant retournement et se rattache pourtant au premier groupe et surtout, dans un sens opposé, la betterave à sucre de 1969 qui, bien qu'ayant occupé le sol d'avril à octobre, a un comportement typique du groupe II.

Pour chercher la cause de ce classement des couples « année-culture » et celle des exceptions que nous venons de signaler, nous avons évalué les quantités d'eau effectivement empruntées à la réserve du sol, pour les trois profondeurs, chaque

TABLEAU 3

*Comparaison du drainage mensuel* (mm) *des cases nues et cultivées*

(betterave à sucre — période avril 1969-mars 1970)

*Cases de 50 cm*

| Mois | 4-69 | 5-69 | 6-69 | 7-69 | 8-69 | 9-69 | 10-69 | 11-69 | 12-69 | 1-70 | 2-70 | 3-70 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Case cultivée | 26,2 | 7,3 | 12,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28,7 | 55 | 104 | 53 | 286,8 |
| Case nue | 19,0 | 7,3 | 6,8 | 2,3 | 15,7 | 0,15 | 0 | 55,9 | 67,4 | 57,5 | 106,5 | 54 | 392,5 |

Différence de drainage 392,5 — 286,8 = *105,7 mm.*

*Cases de 100 cm*

| Mois | 4-69 | 5-69 | 6-69 | 7-69 | 8-69 | 9-69 | 10-69 | 11-69 | 12-69 | 1-70 | 2-70 | 3-70 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Case cultivée | 27,0 | 19,5 | 5,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26,3 | 107,2 | 55,0 | 240,7 |
| Case nue | 20,0 | 11,2 | 14,0 | 5,3 | 16,6 | 2,0 | 1,1 | 54,0 | 68,0 | 54,6 | 112,3 | 56,3 | 415,4 |

Différence de drainage 415,4 — 240,7 = *174,7 mm.*

*Cases de 150 cm*

| Mois | 4-69 | 5-69 | 6-69 | 7-69 | 8-69 | 9-69 | 10-69 | 11-69 | 12-69 | 1-70 | 2-70 | 3-70 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Case cultivée | 27,3 | 22,2 | 18,9 | 2,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7,7 | 98,0 | 58,0 | 234,9 |
| Case nue | 20,7 | 10,7 | 13,4 | 6,9 | 18,6 | 2,8 | 1,9 | 50,3 | 68,1 | 54,2 | 114 | 59,0 | 420,6 |

Différence de drainage 420,6 — 234,9 = *185,7 mm.*

année culturale. Il n'était pas possible pour cela d'établir des profils hydriques en fin de végétation, en raison des perturbations au fonctionnement ultérieur des cases susceptibles d'être occasionnées par le carottage. Nous avons donc comparé les drainages mensuels de chaque catégorie de cases cultivées et de leur homologue « sol nu » entre le début de la végétation et le rétablissement dans les premières d'un régime de drainage analogue à celui des deuxièmes. Dans ces conditions, on peut admettre que le déficit de drainage enregistré au cours et après une culture représente l'emprunt à la réserve lié à l'évaporation supplémentaire, par rapport au sol nu, de la case cultivée.

Le tableau 3 fournit une illustration pour chacune des profondeurs de sol, de cette évolution comparée des drainages ainsi que de l'évaluation des « emprunts supplémentaires à la réserve » qui a pu en être tirée.

Ces évaluations ont été portées sur les graphiques de la figure 1 (courbes en traits interrompus).

On peut tout d'abord observer la similitude générale des courbes figurant, pour chaque année, la variation en fonction de la profondeur du sol, d'une part des rendements, d'autre part des prélèvements sur la réserve du sol en eau. Plus précisément, on note que dans la plupart des cas, une case ne fournit une production plus importante que celle de la case de profondeur plus faible que dans la mesure où le prélèvement sur la réserve, évalué, n'aurait pu être assuré dans cette dernière, faute d'une réserve utile théorique suffisante. C'est ainsi que le comportement de la culture de betterave à sucre de 1969, qui l'avait fait classer dans le groupe II en dépit de la période et de la durée de sa végétation apparaît lié au fait que les emprunts effectifs à la réserve évalués pour les cases de 100 et 150 cm sont voisins (175 et 185 mm) et tous les deux inférieurs à la réserve disponible dans la case de 100 cm soit 210 mm. Par contre, la variation en fonction de la profondeur du rendement de la luzerne en 3$^{e}$ année (1958) paraît indépendante des emprunts évalués à la réserve du sol. C'est la seule exception à la relation qui vient d'être notée ; on peut remarquer qu'elle concerne une culture pérenne dont la production, une année donnée, peut être considérablement influencée par les réserves racinaires constituées l'année précédente. Cette hypothèse est renforcée par le fait que, dès le début du printemps, la végétation est plus abondante sur les cases les plus profondes.

Une deuxième observation porte sur la comparaison des emprunts à la réserve et des réserves utiles théoriques. Dans le cas des cases de 50 cm, les emprunts évalués sont égaux, à 10 p. 100 près par défaut, aux 105 mm de la réserve utile calculée ; et ceci chaque année à la seule exception de 1966 (maïs fourrage de très courte végétation). Pour les cases plus profondes (100 cm et surtout 150 cm), ces emprunts sont beaucoup plus variables selon l'année et (ou) la culture. Ceci nous a conduit à rechercher s'il existait une relation entre l'emprunt effectif à la réserve et les conditions climatiques au cours de la végétation.

Sur le graphique de la figure 2, nous avons porté en abscisse, le déficit climatique en eau correspondant à la période de végétation. Cette donnée a été évaluée par la différence entre la hauteur de pluie et l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Turc ($ETP = \frac{0{,}40\,t}{t + 15}(I_g + 50)$ pendant la période de végétation que nous avons fait débuter 20 jours après le semis (Turc, 1964). En ordonnée figurent les emprunts à la réserve évalués comme il a été indiqué au tableau 1, dans le cas des

cases de 150 cm de profondeur. Les « années-cultures » sont représentées par un signe différent selon le type de réaction des rendements à la profondeur du sol qu'elles ont manifesté.

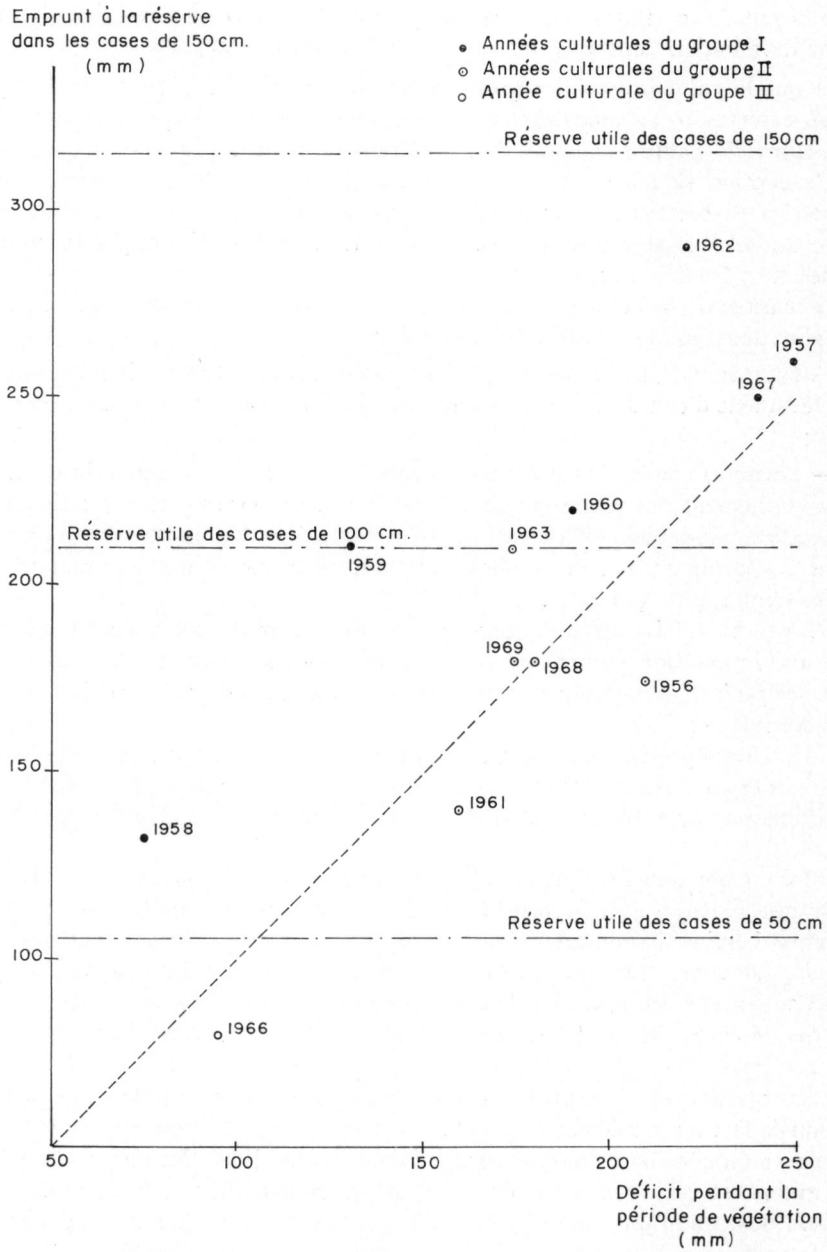



FIG. 2. — *Relation entre le déficit climatique en eau pendant la période de végétation, l'emprunt à la réserve dans les cases de 150 cm et le comportement de la culture en fonction de la profondeur du sol*

On peut constater :

1° qu'il existe une corrélation générale entre le déficit climatique en eau pendant la période de végétation et l'emprunt à la réserve du sol lorsque cette dernière est suffisante, comme c'est toujours le cas des cases de 1,50 m, pour couvrir le déficit. Le coefficient de corrélation entre ces deux séries de données est de 0,755 significativement différent de zéro avec une probabilité de 99 p. 100 ;

2° que la comparaison des prélèvements d'humidité dans les cases de 150 cm avec les réserves utiles aux différentes profondeurs permet de prévoir pour chaque année culturale l'allure générale de la relation profondeur du sol-rendements.

L'exception signalée pour la 3e année de luzerne (1958) se trouve confirmée. De plus, en 1958 et en 1959 seulement, on peut noter un prélèvement d'eau sur la réserve du sol très sensiblement plus élevé que le déficit climatique au cours des périodes de végétation correspondantes.

Le caractère lâche des relations mis en évidence est dû aux différentes approximations auxquelles il a été consenti :

— l'emprunt à la réserve tel qu'il est évalué représente en fait un supplément de prélèvement d'eau dans les cases cultivées par rapport aux cases nues correspondantes ;

— l'évapotranspiration potentielle évaluée à partir des données du C. N. R. A. n'est certainement pas très applicable à des cases sans bordure de végétation, installées dans un environnement climatique très particulier et qui, de ce fait, permettent surtout des comparaisons entre elles, beaucoup plus que situées par rapport à des données climatiques générales.

Il reste toutefois que l'influence de la profondeur du sol apparaît nettement liée à une interaction culture-année climatique — qui peut être exprimée par le déficit des pluies par rapport à l'évapotranspiration au cours de la période de végétation considérée.

Un exemple précis, celui du maïs-grain cultivé en 1962, confirme cette influence déterminante de l'alimentation en eau dans cette comparaison de profondeurs de sols différentes. Le tableau 4 présente les composantes du rendement de cette culture.

On constate que les composantes du rendement qui sont responsables de la plus grande partie des différences de production en fonction de la profondeur sont le nombre d'épis et le nombre de grains par épis, organes qui se forment pendant le mois de juillet, au cours duquel la demande climatique est intense. Ceci explique en particulier, compte tenu des dates d'apparition d'un déficit absolu après épuisement des réserves du sol, les comportements comparés du maïs dans les cases de 50 et 100 cm.

La formation de l'appareil végétatif (poids des pailles), à peu près terminée cette année-là vers la mi-juillet, n'a été affectée par la sécheresse que dans les cases les moins profondes où la réserve est épuisée dès le 20 juin. Par contre, le poids de 1 000 grains est relativement moins lié à la profondeur du sol, vraisemblablement en raison des conditions climatiques moins sévères de la 2e quinzaine d'août et du mois de septembre.

Enfin, nous devons nous garder de conclure que dans les cas où la réserve en eau des cases de 150 cm n'a pas été entièrement utilisée, les besoins de la culture

TABLEAU 4

*Composantes du rendement — Maïs grain 1962*

| Profondeur du sol | 50 cm | 100 cm | 150 cm |
|---|---|---|---|
| Nombre de pieds/case | 37 (132) | 33 (117) | 28 (100) |
| Nombre d'épis bien formés | 0 (0) | 19 (82) | 23 (100) |
| Nombre d'épiochons | 6 (200) | 7 (233) | 3 (100) |
| Nombre de grains/épi | 38 (10) | 242 (63) | 379 (100) |
| Poids de 1 000 grains | 81 (41) | 170 (87) | 195 (100) |
| Grains secs (q/ha) | 1,2 (1) | 53,5 (57) | 94,0 (100) |
| Pailles t/ha (MS) | 3,15 (50) | 6,4 (102) | 6,3 (100) |
| Date de début de déficit en eau compte tenu de la réserve du sol | 20 juin | 1er août | Pas de déficit |

N. B. — Entre parenthèses les valeurs indexées par rapport aux données de la profondeur de 150 cm (égales à 100).

y ont été satisfaits : il a en effet été suffisamment démontré qu'au fur et à mesure qu'on se rapproche du point de flétrissement, l'eau de la réserve est de plus en plus difficilement utilisable : un argument dans ce sens est fourni par le fait que la présence en début de végétation d'une réserve d'eau supplémentaire dans une case à drainage limitée à 100 cm a conduit à un accroissement de production par rapport aux cases de 150 cm à drainage libre, non seulement dans le cas du maïs de 1962 (+ 25 p. 100) où la réserve de ces dernières a été épuisée, mais aussi dans le cas de la betterave à sucre de 1969 (+ 30 p. 100) où pourtant moins des 2/3 de l'eau de la réserve des cases à drainage libre avait été prélevée.

En définitive, si l'on compare les productions d'une série de cultures au cours de différentes années sur des sols de profondeur variable, on peut constater l'importance déterminante de l'interaction « conditions climatiques de l'année × type de culture ». Cette interaction semble pouvoir être exprimée de façon assez satisfaisante par le déficit en eau au cours de la période de végétation correspondant à la culture considérée. La seule exception notable à cette tendance est représentée par les 3e et 4e années d'une culture pérenne : la luzerne. Ces deux observations ayant pourtant été faites une année très humide (1958) et une année très sèche (1959) : dans le premier cas, l'accroissement de rendement lorsque la profondeur du sol passe de 100 à 150 cm a été acquis sans consommation d'eau supplémentaire décelable au moyen des bilans généraux que nous avons utilisés ; dans le deuxième cas, l'exception provient du fait que l'accroissement du prélèvement sur la réserve dans les mêmes conditions n'était pas prévisible à partir du déficit en eau au cours de la végétation. L'examen

des hypothèses que l'on peut avancer à cet égard : exploitation totale du sol par le système racinaire dès le début de la végétation, importance, une année donnée, des réserves racinaires constituées l'année précédente, conduiraient vraisemblablement à préciser le rôle du système racinaire par rapport à l'évapotranspiration réelle.

Par ailleurs, si une évaluation approximative des prélèvements totaux sur la réserve du sol permet de prévoir l'allure générale de l'influence de la profondeur du sol sur le rendement, il apparaît clairement (cas du maïs en 1962) que la position des périodes critiques du développement par rapport à l'évolution des disponibilités en eau peut être déterminante.

En d'autres termes, un essai de classement général des années culturales suivant l'allure de la variation des rendements en fonction de la profondeur du sol, s'il permet de contribuer à la détermination des potentialités d'une région, ne peut remplacer des recherches plus précises destinées à améliorer le contrôle de l'alimentation en eau des cultures.

*Reçu pour publication en décembre 1970.*

## SUMMARY

### LYSIMETRIC INVESTIGATION ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE DEPTH OF SOIL AND CROP YIELDS

The relationship between the depth of soil and crop yields has been investigated in lysimeter plots over a period of 14 years.

The classification of crops according to their reaction to the depth of soil matches pretty well, as a first approximation, with the one that would be derived from their period and duration of vegetation.

Yet, a better forecast as to the behaviour is achievable by considering the interaction, *i. e.*, year × crop as shown in the form of the climatic water deficiency evaluated yearly during the growth of the crop involved.

Comparing such deficiency with the growth-water available at the various depths tested permits of improving the foregoing classification and to ascribe to the conditions in which the plants are supplied with water the relationship of the depth of soil with the crop yield. A more specific study of the yield components of a grain-maize corroborates this conclusion and shows clearly the importance of the time at which water deficiencies occur, duly allowing for the moisture available in the soil.

## ZUSAMMENFASSUNG

### IN LYSIMETERN DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER BODENTIEFE AUF DEN ERTRAG DER KULTUREN

Der Einfluss der Bodentiefe auf die Erzeugung verschiedener Kulturen wurde im Laufe eines vierzehnjärigen Zeitabschnittes untersucht.

In erster Annäherung entspricht die Einteilung der Kulturen in Klassen je nach ihrer Reaktion hinsichtlich der Bodentiefe der Einteilung, die sich aus ihrer Wachstumsperiode und Wachstumsdauer ableiten lässt.

Ein besserer Verhaltensvoranschlag wird jedoch erhalten, wenn man die Interaktion Jahr × Kultur berücksichtigt, die für jedes Jahr im Laufe des Wachstums der betreffenden Kultur auf Grund des berechneten klimatischen Wasserdefizits veranschaulicht wird.

Der Vergleich dieses Defizits mit den nutzbaren Wasservorräten, die in den verschiedenen

untersuchten Tiefen verfügbar sind, erlaubt die vorstehende Einteilung zu verbessern und den Wasserversorgungsbedingungen der Pflanze den Einfluss der Bodentiefe auf den Ertrag zuzufügen. — Eine besondere Untersuchung der Ertragszusammensetzungen eines Körnermaises bestätigt diese Schlussfolgerung und präzisiert die Bedeutung der Erscheinungszeitpunkte des Wasserdefizits unter Berücksichtigung des Bodenvorrates.

## РЕЗЮМЕ

Изучение влияния глубины почвы на урожайность культур в лизиметрических делянках.

Г. МОННЬЕ.

В лизиметрических делянках, в течении 14-ти лет, изучалось влияние глубины почвы на урожайность различных культур.

Классификация этих культур, в зависимости от их реакции на глубину почвы, приблизительно совпадает с классификацией основанной на вегетационном периоде и на его длительности.

Однако, еще лучший прогноз поведения испытывавщихся культур был получен принимая во внимание взаимодействие год х культура конкретизующееся климатическим водным дефицитом, исчисленным для каждого года в течении вегетационного периода данной культуры.

Сравнение этого дефицита с запасами полезной влаги, расположенными на различных глубинах в почве, позволяет уточнить полученную классификацию и позволяет отнести влияние глубины почвы на урожайность к условиям водного питания растения. Более углубленное изучение компонент урожайности кукурузы на зерно подтверждает эти выводы и выявляет, принимая во внимание почвенные запасы влаги, всю важность эпох появления водного дефицита.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Hénin S., Gras R., Monnier G., 1969. *Le Profil Cultural. L'État physique du sol et ses conséquences agronomiques.* Masson et C e, Paris.

Turc L., 1964. Évapotranspiration potentielle mensuelle ou décadaire. Son évaluation en fonction des données météorologiques. *C. R. Colloque Franco-Polonais de l'Aménagement et de l'Économie de l'eau,* Varsovie, Rapport nº 24, 251-264.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (2), 197-211.

# ÉTUDE DE LA MOBILITÉ DE L'EAU NON SATURANTE DANS DES COLONNES DE SOLS SOUMISES A L'ÉVAPORATION ; INFLUENCE DE LA TEXTURE ET DE LA TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE

J. MORIZET (1) et R. MILLET

*Station d'agronomie, I. N. R. A., 30, rue Vieille-Prison, 36 - Châteauroux*

RÉSUMÉ

Des colonnes de sols humides, très différents quant à leur nature, ont été soumises à une évaporation de surface : la durée de ce traitement allait de 8 heures à 6 jours. Pour apprécier la mobilité de l'eau, un indice a été proposé. Il est calculé à partir des profils hydriques en considérant le rapport du volume d'eau perdu par la tranche inférieure de la colonne à celui perdu par la tranche supérieure. Les influences de la texture et de la matière organique ont été précisées. Il ressort de cette étude que pour les terres de culture où la fraction humifiée de la matière organique est généralement importante, le rapport $\frac{\text{limon } (2 - 20\ \mu)}{\text{argile } (< 2\ \mu)}$ donne une indication satisfaisante de la valeur de la mobilité de l'eau. Celle-ci, en effet, est sous la dépendance, pour une très large part, de la distribution de la taille des éléments fins, mais varie peu avec la proportion des éléments fins par rapport aux éléments grossiers. Enfin, les résultats obtenus montrent que le taux d'évaporation dépend à la fois de la mobilité de l'eau et de l'humidité volumique du sol. Une exploitation de ces données est proposée pour une meilleure compréhension des modalités d'alimentation hydrique des plantes en fonction des contraintes climatiques.

## I. — INTRODUCTION

Le plus souvent, les chercheurs qui ont abordé l'étude de la circulation de l'eau non saturante dans les sols, ont donné à leurs travaux une orientation plutôt physique qu'agronomique en s'efforçant de traduire leurs résultats expérimentaux par

(1) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 63 - Clermont-Ferrand.

des formulations mathématiques que l'analogie de comportement avec d'autres phénomènes (propagation de la chaleur — diffusion des corps dissous — électricité) eur avait suggérées.

Cependant, cette façon d'appréhender le problème, pour féconde qu'elle soit en rendant compte de certains résultats, ne permet pas toujours d'expliquer le comportement de l'eau dans le sol. Des limites à l'utilisation de ce modèle ont notamment été fournies par HALLAIRE et HÉNIN (1958), SWARTZENDRUBER (1963) et HADAS (1964). Pour présenter un schéma plus conforme à la réalité, HALLAIRE (1963) a introduit la notion de potentiel efficace.

En même temps, cet auteur a donné une orientation plus agronomique à ces recherches en fournissant des éléments de réponse à l'étude du système eau-sol-plante.

Dans un travail précédent (1967), nous nous étions également efforcés de répondre à ces préoccupations en comparant le comportement hydrique de différents sols soumis à un régime de dessèchement par évaporation de surface. Il apparaissait que différents paramètres concernant la nature du sol (texture) et son état au moment du test (humidité et à un degré moindre, porosité) avaient une incidence marquée sur la mobilité de l'eau. PUECH (1969), en partant de conditions expérimentales différentes (absorption par un gel de silice), avait abouti à des conclusions voisines tout en insistant plus particulièrement sur la répercussion de la vitesse de dessèchement sur la cession de l'eau par le sol.

Les essais, dont nous exposerons les résultats dans ce mémoire, complètent ceux réalisés antérieurement. Des dessiccations plus poussées ont permis de recueillir davantage d'informations sur l'évolution des profils hydriques. D'autre part, grâce à une gamme de terres plus étendue, les influences de la texture et de la teneur en matière organique ont pu être précisées. Enfin, les valeurs des débits d'évaporation ont été analysées en fonction à la fois de la mobilité de l'eau et des réserves hydriques des différents sols.

## II. — TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIAUX UTILISÉS

La technique expérimentale utilisée est presque analogue à celle retenue précédemment par les auteurs (1967). Seules de légères modifications ont été apportées pour améliorer les conditions de réalisations des essais.

— Le remplissage de la terre préalablement humidifiée est réalisé par tranches tassées successivement (la partie supérieure de chaque couche est soumise à un griffage qui évite les effets de lissage préjudiciables à la circulation de l'eau). L'opérateur travaillant manuellement exerce une pression aussi identique que possible lors de chaque tassement. Cette méthode permet d'aboutir à des résultats suffisamment reproductibles pour procéder à des comparaisons de porosités entre les divers échantillons.

— L'aération de l'étuve est effectuée par un ventilateur assurant une uniformisation satisfaisante de la température et de l'état hygrométrique de l'air. L'intensité d'évaporation contrôlée par un évaporomètre Piche atteint, en moyenne, 6,8 mm/jour. L'évaporation d'un plan d'eau libre donne 10,2 mm/jour.

— Le décollement circulaire qui apparaît à la suite du retrait des terres argileuses au cours de la dessiccation entraîne une évaporation supplémentaire qui rend difficile les comparaisons avec les terres non argileuses. Pour éviter cet inconvénient, les échantillons argileux sont intro-

duits dans des manchons en feuille souple de polyéthylène qui s'appliquent aux colonnes de sol tout au long du traitement (1).

Les terres utilisées au cours des essais peuvent être réparties en trois groupes :

1° treize terres de sous-sol contenant moins de 1 p. 100 de matière organique ;

2° huit terres de surface dont la teneur en matière organique est comprise entre 1 et 4 p. 100 ;

3° huit terres de surface riches en matière organique : entre 5 et 10 p. 100.

A cette gamme d'échantillons, il faut ajouter 4 mélanges de sous-sols caractérisés par des teneurs identiques en argile ce qui a permis d'étudier l'influence spécifique du limon sur la mobilité de l'eau.

## III. — RÉSULTATS OBTENUS

### 1. — *Évolution des profils hydriques au cours du dessèchement*

Les terres de sous-sol et deux terres très humifères, préalablement humidifiées à la capacité de rétention (2), ont été ensuite soumises à l'évaporation pendant des durées allant de 8 heures à 6 jours. Les profils hydriques de quatre échantillons sont présentés à la figure 1. Ils ont été choisis car ils représentent chacun un type de comportement différent. Leurs caractéristiques physiques sont les suivantes :

| Numéros et localisations des échantillons | Argile < 2 μ | Limons fins 2-20 μ | Limons grossiers 20-50 μ | Sables 50-2000 μ | Matière organique (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| C 573 Gy I ..... | 2,5 | 5,3 | 8,0 | 82,0 | 0,1 |
| C 585 Arthon ..... | 23,5 | 24,5 | 23,6 | 26,6 | 0,3 |
| C 578 Fleuranderie III. | 50,8 | 19,8 | 17,1 | 7,0 | 0,6 |
| C 647 Les Pornets I ... | 11,8 | 17,5 | 19,9 | 42,4 | 5,5 |

L'observation des courbes suggère les remarques suivantes :

— le caractère plus ou moins accusé des gradients d'humidité dans la partie supérieure des profils se manifeste dès le début de l'évaporation. Ainsi, au cours de ce premier stade dans lequel les transferts de l'eau se font sous phase liquide, se dessine l'allure de la courbe qui conditionne le dessèchement ultérieur ;

— le volume des réserves en eau joue évidemment un rôle important dans les processus de transfert, surtout après un jour d'évaporation (comparaison sous-sol sableux et sous-sol argileux).

Ces deux remarques laissent à penser qu'il est préférable de choisir des temps d'évaporation courts (8 heures ou 1 jour) pour apprécier la mobilité de l'eau dans des sols de nature très différente afin d'éviter l'interférence qui pourrait se produire avec l'importance des réserves en eau.

— L'apparition d'un point d'inflexion se manifeste dans les profils hydriques relatifs aux échantillons C 573 (sable) et C 647 (sable limoneux, très humifère). Par

(1) Procédé utilisé par RAFI (1964).

(2) Capacité de rétention déterminée d'après la méthode FÉODOROFF et BÉTRÉMIEUX (1964).

contre, là où les teneurs en argile sont plus élevées C 585 et C 578, la partie supérieure de la courbe est presque linéaire sans point d'inflexion même pour les dessiccations importantes. Ceci est peut-être dû aux conditions dans lesquelles les essais sont effectués car dans d'autres circonstances, avec des sols argileux, le point d'inflexion peut apparaître (communication personnelle de FEODOROFF).

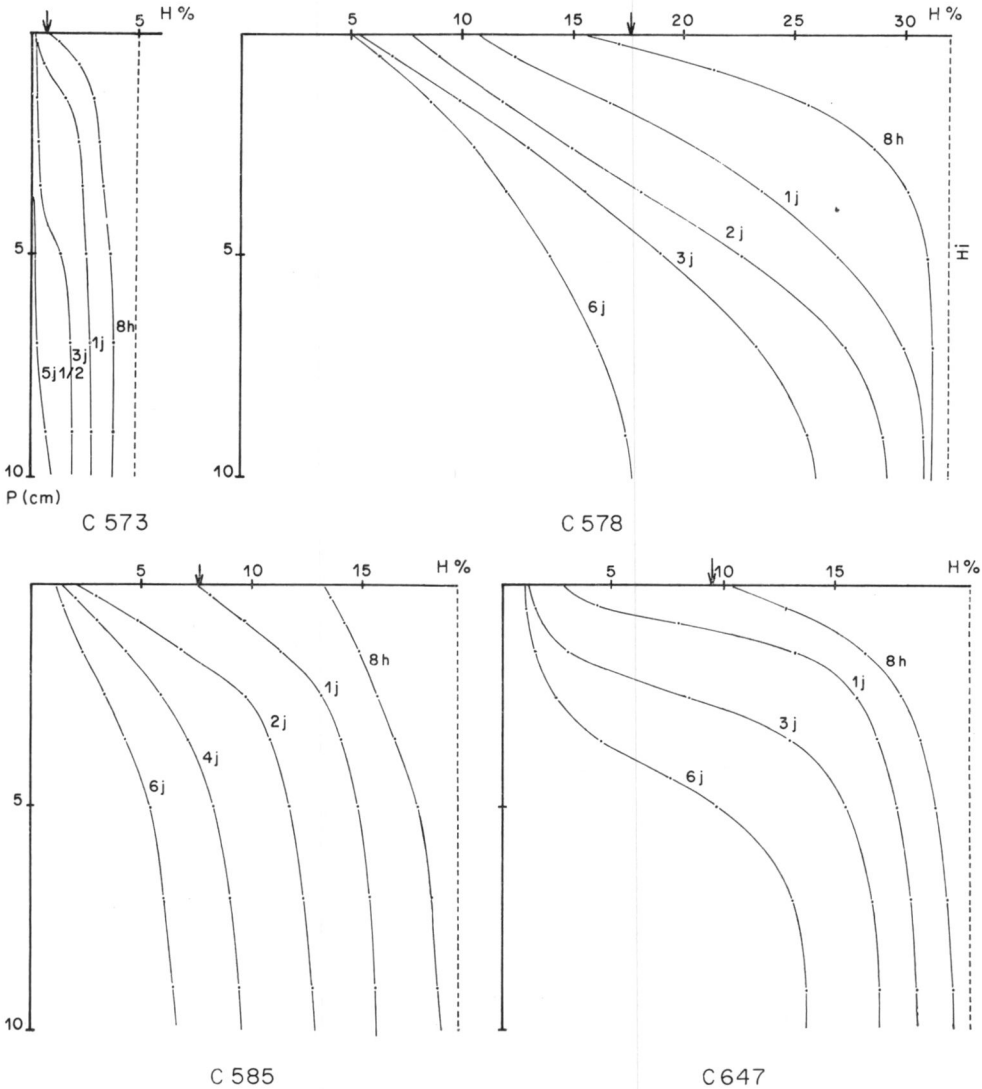



FIG. 1. — *Profils hydriques au cours du dessèchement*
↓ : humidité correspondant au pF 4.2

### 2. — *Appréciation de la mobilité de l'eau par un indice déterminé à partir des profils hydriques*

Dans un travail précédent (MORIZET, 1967), nous avions utilisé l'indice $\alpha$ déduit de l'étude mathématique des courbes de profils hydriques pour caractériser la mobilité de l'eau. Cependant, avec une gamme étendue de terres bien différentes, il est apparu que la relation d'ajustement utilisée ne pouvait rendre compte de la forme de toutes les courbes même en se plaçant dans les limites de temps qui avaient été précisées.

C'est la raison pour laquelle nous avons choisi un autre indice qui ne préjuge pas du type d'équation des courbes mais qui permette de chiffrer la « facilité de transfert » de l'eau vers la surface évaporante. Il s'agit de l'indice $m$ : rapport des quantités d'eau perdues par la tranche inférieure (5-10 cm) de la colonne à celles perdues par la tranche supérieure (0-5 cm). Plus cet indice tend vers 1, et meilleure est la mobilité de l'eau. PUECH (1969) a d'ailleurs proposé une formule d'estimation voisine.

Pour les raisons que nous avons déjà invoquées, les courbes permettant de calculer l'indice $m$ sont relatives à un temps d'évaporation court : nous avons choisi une journée.

A cette façon de procéder, on peut faire l'objection que l'indice de mobilité ainsi défini est une caractéristique globale qu'il n'est pas possible de rattacher à une humidité définie. Or, il est bien connu que les coefficients couramment utilisés comme la conductivité ou la diffusivité varient beaucoup avec l'humidité. Cependant, il nous est apparu que cette appréciation pour grossière qu'elle puisse paraître, a l'avantage de rendre compte, d'une façon simple, des possibilités plus ou moins grandes des transferts de l'eau selon les sols dans une gamme d'humidités utiles à la plante.

### 3. — *Influence de la texture. Rôle de la fraction granulométrique 2-20 µ*

Récemment, nous avions mis en évidence le rôle de l'argile dans la mobilité de l'eau (MORIZET, 1967). Sa présence en quantité importante entraîne une réduction de celle-ci.

Afin d'apprécier l'influence de la teneur en limon, nous avons préparé des mélanges de sous-sols dont les taux d'argile soient pratiquement identiques (compris entre 15 et 16 p. 100). Pour cette étude comparative, leur a été adjoint le sous-sol C 626 (teneur en argile = 14,8 p. 100).

Les indices de mobilité $m$ calculés après un jour d'évaporation et à partir d'une humidité initiale correspondant à la capacité de rétention, donnent les chiffres suivants :

| Numéros des échantillons | Indice de mobilité $m$ | Granulométrie | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Limons fins (2-20 µ) | Limons grossiers (20-50 µ) | Sables (50-500 µ) | Sables (500-2 000 µ) |
| C 626 Saint-Julien | 0,71 | 27,5 | 17,7 | 18,2 | 19,9 |
| 31 | 0,66 | 24,7 | 23,0 | 28,9 | 6,2 |
| 30 | 0,59 | 17,8 | 17,0 | 39,1 | 8,3 |
| 32 | 0,27 | 2,5 | 0,4 | 79,2 | 0,6 |
| 33 | 0,16 | 2,5 | 0,4 | 0,8 | 79,0 |

Quand les teneurs en argile et en matière organique n'interviennent pas, il apparaît, d'après ces résultats, que la mobilité de l'eau varie dans le même sens que la teneur en limon ; la corrélation semblant plus étroite avec la fraction fine 2-20 μ.

D'autre part, la comparaison des échantillons 32 et 33 indique que la présence de sable grossier (500-2 000 μ), en quantité très importante : 79 p. 100, augmente légèrement la résistance à la circulation de l'eau.

### 4. — *Influence de la teneur en matière organique*

Les essais réalisés pour étudier l'influence de la teneur en matière organique ont porté sur 8 couples d'échantillons comprenant chacun :

— un prélèvement effectué au sommet du profil (généralement forestier) et donc riche en matière organique (entre 5 et 10 p. 100) ;

— un prélèvement effectué au-dessous du premier et moins humifère (entre 1 et 4 p. 100).

En outre, à cette différence quantitative de matière organique s'ajoute une différence qualitative : la fraction correspondant à l'horizon inférieur étant plus humifiée que l'autre (tabl. 1).

Les granulométries voisines de chaque couple permettent de mettre en évidence l'action spécifique de la matière organique telle qu'elle apparaît dans le tableau ci-dessous :

| Localisations des échantillons | Mobilité *m* | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Échantillons peu ou moyennement humifères | | Échantillons très humifères | |
| | $H_i$ = pF 3 | $H_i$ = C.R. | $H_i$ = pF 3 | $H_i$ = C.R. |
| Montierchaume | 0,39 | 0,58 | 0,20 | 0,69 |
| Les Druides | 0,67 | 0,85 | 0,20 | 0,49 |
| Les Pornets | 0,53 | 0,68 | 0,11 | 0,40 |
| Les Deffents | 0,14 | 0,15 | 0,18 | 0,12 |
| Courcenai 8 | 0,53 | 0,72 | 0,11 | 0,32 |
| Courcenai W | 0,32 | 0,74 | 0,07 | 0,39 |
| Le Bouffe | 0,51 | 0,78 | 0,24 | 0,66 |
| Ozans | 0,07 | 0,32 | 0,10 | 0,13 |

D'une façon générale, il ressort que dans les échantillons très humifères, la mobilité de l'eau est plus faible que dans les autres. Quelques exceptions sont à signaler mais il s'agit, en l'occurrence, de sols argileux tels les couples : Montierchaume (A = 27,8 p. 100) et Les Deffents (A = 40,5 p. 100) où les différences sont peu accusées.

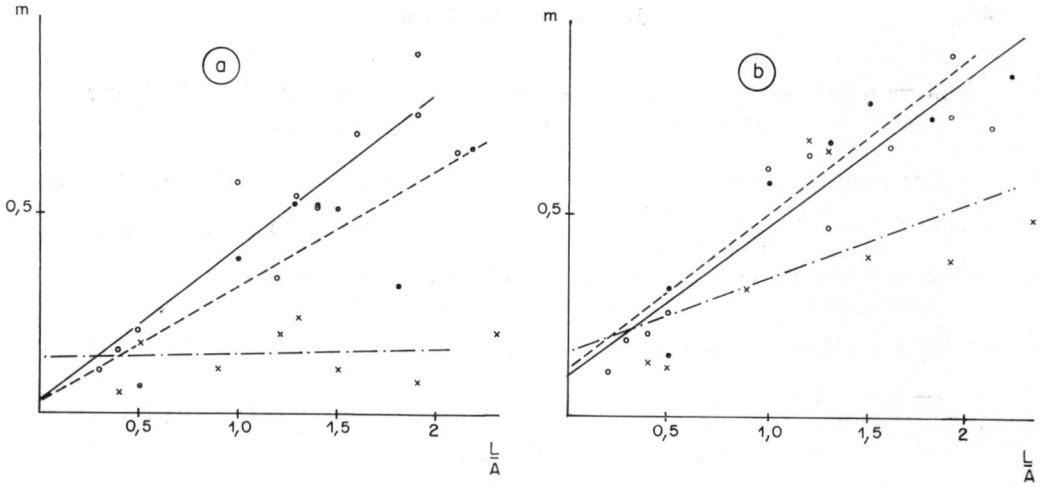



FIG. 2. — *Influence de la texture* (rapport $\frac{\text{Limon}}{\text{Argile}}$) *sur la mobilité de l'eau*

*a*) Humidité initiale : pF 3
*b*) Humidité initiale : CR
— o — terres de sous-sol
— — ● — terres de surface moyennement humifères
— · — × · — terres de surface très humifères

TABLEAU I

*Fractionnement densimétrique de la matière organique des échantillons humifères*
(Méthode MONNIER (1962) ; densité de la liqueur de fractionnement = 2)

| Localisation des échantillons | Profondeur de prélèvement en cm | Matières organiques liées (% de la terre fine) | Matières organiques libres (% de la terre fine) | Matières organiques totales (% de la terre fine) | mat. org. libres / mat. org. tot. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Montierchaume | 0-5 | 3,07 | 1,74 | 4,81 | 36 |
| | 10-20 | 0,99 | 0,22 | 1,21 | 18 |
| Les Druides | 0-5 | 2,94 | 3,22 | 6,16 | 52 |
| | 10-20 | 1,38 | 0,28 | 1,66 | 17 |
| Les Pornets | 0-5 | 2,64 | 1,50 | 4,14 | 36 |
| | 10-20 | 1,11 | 0,28 | 1,39 | 20 |
| Les Deffents | 0-5 | 5,38 | 2,55 | 7,93 | 32 |
| | 10-20 | 3,04 | 0,26 | 3,30 | 8 |
| Courcenai | 0-5 | 2,49 | 2,50 | 4,99 | 50 |
| | 10-20 | 1,19 | 0,26 | 1,45 | 18 |
| Courcenai ouest | 0-5 | 2,41 | 2,70 | 5,11 | 53 |
| | 10-20 | 1,73 | 0,33 | 2,06 | 16 |
| Le Bouffe | 0-5 | 3,17 | 2,46 | 5,63 | 44 |
| | 10-20 | 1,96 | 0,67 | 2,63 | 25 |
| Ozans | 0-5 | 4,20 | 2,10 | 6,30 | 30 |
| | 10-20 | 1,40 | 0,06 | 1,46 | 4 |

5. — *Étude des liaisons entre la mobilité de l'eau et les paramètres physiques : granulométrie et teneur en matière organique*

Les résultats obtenus suggèrent d'abord de comparer la mobilité de l'eau au rapport $\frac{L_f}{A} = \frac{\text{limons fins } (2\text{-}20\ \mu)}{\text{argile } (< 2\ \mu)}$ puisque celle-ci varie dans le même sens que la teneur en limon et que l'argile exerce une influence en sens opposé.

Les équations de régression sont les suivantes (fig. 2) :

*a*) humidités initiales correspondant au $pF = 3$ ;

— terres de sous-sol :

$$m = 0{,}38 \frac{L_f}{A} + 0{,}03 \quad (r = 0{,}91) ;$$

— terres de surface moyennement humifères :

$$m = 0{,}29 \frac{L_f}{A} + 0{,}03 \quad (r = 0{,}82) ;$$

— terres de surface très humifères :

$$m = 0{,}009 \frac{L_f}{A} + 0{,}14 \quad (r = 0{,}10) ;$$

*b*) humidités initiales correspondant à la capacité de rétention (C. R.) ;

— terres de sous-sol :

$$m = 0{,}37 \frac{L_f}{A} + 0{,}10 \quad (r = 0{,}93) ;$$

— terres de surface moyennement humifères :

$$m = 0{,}38 \frac{L_f}{A} + 0{,}12 \quad (r = 0{,}92) ;$$

— terres de surface très humifères :

$$m = 0{,}18 \frac{L_f}{A} + 0{,}16 \quad (r = 0{,}57).$$

En reprenant successivement ces deux cas, on peut formuler les observations suivantes :

*Humidité initiale relativement faible* ($pF = 3$).

L'incidence de la matière organique s'extériorise déjà avec les terres de surface moyennement humifères en réduisant le rôle de la répartition texturale des éléments fins.

Avec les terres de surface très humifères, cette tendance s'accentue au point de rendre négligeable l'influence du rapport $\frac{L_f}{A}$.

*Humidité initiale plus élevée* (*capacité de rétention*).

Pour les terres de sous-sol et les terres de surface moyennement humifères, les droites de régression ont des positions très voisines et les coefficients de corrélation sont élevés. Dans ce cas, la présence d'une matière organique, humifiée en grande partie, n'a pas de répercussion sur la mobilité de l'eau.

Il n'en est pas de même avec la matière organique peu humifiée (terres très riches en matière organique dans le cas de nos essais), dont l'action se marque par la réduction de la mobilité de l'eau et la diminution de la corrélation entre celle-ci et la répartition granulométrique des éléments du sol.

L'influence de l'humidité initiale apparaît nettement si l'on calcule des équations de régression incluant à la fois les teneurs en argile, limon et matière organique. C'est ainsi que le coefficient affectant la matière organique serait six fois plus élevé avec $H_i$ = p F 3 (*a*) que pour $H_i$ = capacité de rétention (*b*) (fig. 3).

$$a)\ m = 0{,}53\ \frac{L_f}{A + 6\ MO} \quad (r = 0{,}89).$$

$$b)\ m = 0{,}43\ \frac{L_f}{A + MO} + 0{,}08 \quad (r = 0{,}89).$$

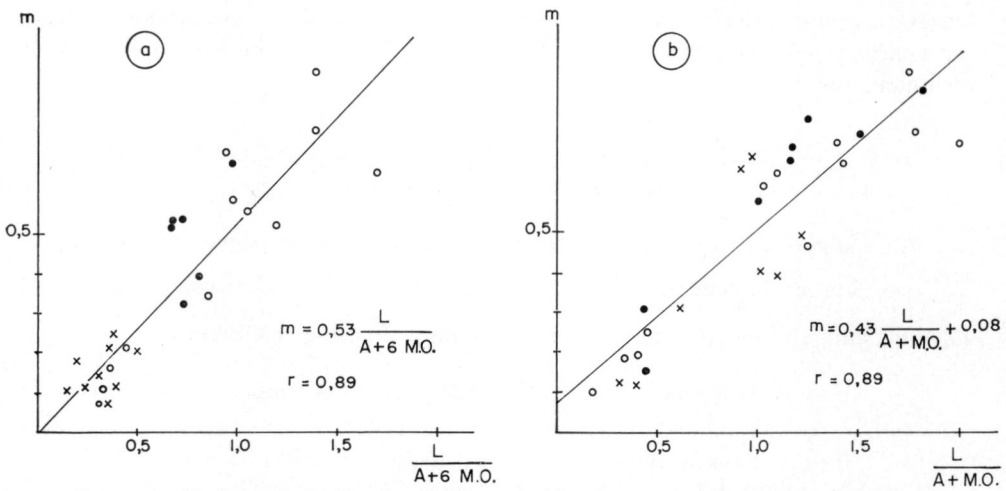



FIG. 3. — *Variation de l'indice de mobilité en fonction des caractéristiques physiques des sols*
*a*) $H_i$ = *p*F 3
*b*) $H_i$ = CR

## IV. — DISCUSSION

### 1. — *Remarques sur l'importance des différents paramètres ayant une incidence sur la mobilité de l'eau*

Dans ce qui précède, nous avons présenté des résultats concernant les liaisons qui pouvaient exister entre la texture et la teneur en matière organique d'une part et la mobilité de l'eau d'autre part. Mais d'autres facteurs interviennent, notamment : l'humidité du sol et la porosité.

Pour le premier, nous avons noté l'incidence de l'humidité initiale sur l'importance du rôle joué par la matière organique (fig. 2). Cependant celle-ci est faible lorsque le taux d'humification est élevé : cas de nombreuses terres de culture. En prenant comme humidité initiale la capacité de rétention, humidité qui, en agrono-

mie, peut-être considérée comme celle à partir de laquelle commence le dessèchement, on peut observer que le rapport $\frac{L_f}{A}$ fournit une bonne indication sur la mobilité de l'eau dans le sol.

La porosité joue évidemment un rôle important comme PUECH l'a montré récemment (1969). Nous-mêmes, dans un précédent mémoire (MORIZET, 1967), avons noté l'incidence de la porosité totale. Mais à ce propos, il faut souligner la relation qui existe entre la nature du sol (texture, matière organique) et la porosité qui en dépend pour une large part, bien que des interventions extérieures puissent la modifier, notamment dans la tranche superficielle du sol.

C'est ainsi que la porosité totale, qui ne constitue pourtant qu'une appréciation globale et sommaire des caractéristiques d'agencement des éléments texturaux et structuraux, est le reflet assez fidèle de la nature du sol. Par exemple, les terres argileuses ou très humifères, qui opposent une forte résistance à la circulation de l'eau, ont généralement une porosité totale élevée et c'est l'inverse pour les terres sableuses et limoneuses.

### 2. — *Essai d'explication du rôle joué par la phase fine du sol et par la matière organique*

Nous avons vu que la distribution des éléments fins, exprimée par le rapport $\frac{L_f}{A}$, constitue un facteur important pour la mobilité de l'eau. Par contre, la fraction sableuse joue un rôle très limité comme le souligne le tableau suivant :

| Échantillons | $\frac{L_f}{A}$ | L + A | S total | $m$ |
|---|---|---|---|---|
| 1° C-626-Saint-Julien | 1,8 | 60,0 | 38,1 | 0,71 |
| 2° Luant III | 0,45 | 59,7 | 37,9 | 0,24 |
| 3° Gy I | 2,1 | 15,8 | 82,0 | 0,72 |

Si les rapports $\frac{L_f}{A}$ sont différents, les indices $m$ le sont également, même si le taux de sable et les taux de l'ensemble : limon + argile sont très voisins (échantillons 1 et 2). Inversement, les quantités d'éléments fins et grossiers peuvent être très différents et la mobilité de l'eau identique pour deux échantillons (1 et 3) présentant des rapports $\frac{L_f}{A}$ voisins.

Ceci conduit à se représenter, dans le sol en voie de dessèchement, un système conducteur constitué essentiellement par une matrice d'éléments fins pouvant être caractérisée par sa teneur en argile et en limon fin. A l'intérieur de cette matrice, à la capacité de rétention, l'eau occupe ce qu'il est convenu d'appeler la microporosité. Selon le type de microporosité déterminé par la distribution des éléments fins $\left(\text{rapport } \frac{L_f}{A}\right)$, la mobilité de l'eau sera plus ou moins grande ;

— dans un sol très argileux, la présence des pores très petits explique la forte résistance à la circulation de l'eau (loi de Poiseuille) ;

— au contraire, dans un sol où la fraction limoneuse prédomine, la taille moyenne des pores est plus importante, permettant ainsi une plus grande facilité de transfert de l'eau. Ce schéma rejoint les hypothèses formulées par BAVER (1956) et PUECH (1969).

Donc la mobilité de l'eau à travers la trame conductrice du sol dépend de la composition texturale de cette dernière caractérisée au mieux par le rapport $\frac{L_f}{A}$. C'est le cas des terres non organiques.

Pour les terres humifères, nous avons constaté que la composition texturale de la phase fine $\left(\frac{L_f}{A}\right)$ perd plus ou moins de son importance. On peut penser alors qu'un autre facteur intervient. Dans ce cas, la mobilité de l'eau pourrait dépendre non seulement de la composition de la matrice mais également de sa continuité. En effet, la matière organique peut agir par les effets de structuration qu'elle entraîne. Cette incidence est marquée avec la matière organique fraîche susceptible de provoquer des discontinuités structurales importantes au sein de la phase conductrice. Au contraire, l'action de la fraction humifiée qui agit plutôt comme « ciment » est beaucoup plus faible. Cette interprétation rend également compte du fait que l'influence de la matière organique fraîche s'extériorise moins avec des humidités initiales plus fortes ; dans ce cas, il est vraisemblable que les fentes de structuration étant remplies d'eau ne constituent pas un facteur de résistance aux transferts liquides.

### 3. — *Débits, mobilité et humidités volumiques*

La notion de mobilité ne s'applique qu'à la matrice conductrice du sol. Elle ne peut donc, à elle seule, renseigner sur la valeur des débits obtenus qui concernent l'ensemble du sol.

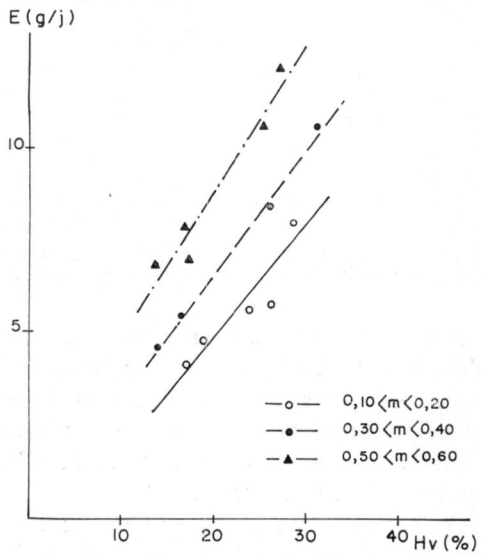



FIG. 4. — *Évaporation en fonction des humidités volumiques*
Humidité initiale : *p*F 3
Durée d'évaporation : 1 jour

Suivant la quantité d'éléments fins, la matrice représente une fraction plus ou moins importante du sol, ce qui détermine également une section utile à la circulation de l'eau plus ou moins grande. Donc, pour des conditions de demande extérieure donnée (pouvoir évaporant), il est raisonnable de penser que le débit D dépend à la fois de la mobilité $m$ et de la section utile, donc de l'humidité volumique $H_v$ :

$$D = f(m, H_v)$$

Les résultats expérimentaux confirment cette façon de raisonner (fig. 4).

4. — *Essai d'application à l'étude de l'alimentation hydrique des plantes*

Ces données obtenues par évaporation au laboratoire peuvent, semble-t-il, contribuer à la compréhension des modalités d'alimentation hydrique des plantes, à condition de définir le domaine dans lequel elles sont susceptibles de s'appliquer.

Dans les conditions naturelles, avec un couvert végétal, l'évapotranspiration n'est pas seulement fonction des conditions de fourniture d'eau par le sol, mais elle dépend également, pour une large part, de l'intensité de la demande.

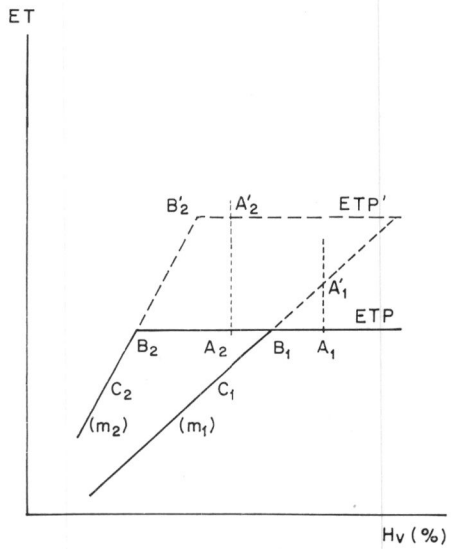



FIG. 5. — *Incidence de la mobilité de l'eau dans le sol sur l'évapotranspiration d'un couvert végétal pour deux niveaux d'ETP.*

HALLAIRE (1960 et 1963) a, de plus, montré que, dans la mesure où la demande n'est pas trop forte, l'évapotranspiration peut rester constante et égale à la demande jusqu'à un certain degré de dessiccation du sol, dessiccation qui constitue alors, un seuil au-delà duquel l'évapotranspiration diminue. Ce même auteur a montré que, pour une masse de sol donnée, cette humidité critique est d'autant plus élevée que l'évapotranspiration potentielle est plus forte.

En s'inspirant de ces résultats et en les complétant par les données que nous avons obtenues, nous pouvons proposer le schéma suivant de l'incidence de la molité de l'eau dans le sol sur l'évapotranspiration d'un couvert végétal (fig. 5).

Lorsque l'évapotranspiration potentielle est faible (ETP), l'évapotranspiration

du couvert végétal peut rester constante relativement longtemps. Le temps durant lequel elle se maintient au niveau de l'ETP est fonction de l'humidité initiale et de la nature du sol. Prenons comme humidité initiale la capacité de rétention indiquée par les points A sur la figure. Pour un sol caractérisé par un taux élevé d'argile par rapport à sa teneur en limon, le cheminement au cours de la dessiccation du point indiquant l'évapotranspiration sera $A_1$, $B_1$, $C_1$.

Si, au contraire, on a affaire à un sol dont les éléments fins sont représentés essentiellement par des limons, le cheminement sera $A_2$, $B_2$, $C_2$.

Dans le cas d'une évapotranspiration potentielle plus intense (ETP'), il peut se faire que dès la capacité de rétention, le sol 1, à cause de la faible mobilité $m_1$, ne puisse fournir à la plante une quantité d'eau suffisante pour répondre à la demande : cheminement $A'_1$, $B_1$, $C_1$. Au contraire, le sol 2 peut permettre à la plante de se trouver dans les conditions hydriques optima correspondant à l'ETP durant un certain temps ($A'_1$, $B'_1$), au-delà duquel un déficit de transfert se manifeste ($B'_2$, $B_2$, $C_2$).

Par ces exemples, on voit que l'on peut imaginer de multiples possibilités en faisant varier les trois paramètres : réserves en eau, mobilité de l'eau et ETP.

## V. — CONCLUSIONS

En utilisant une grande étendue de terres très différentes, nous avons été amenés à choisir un indice de mobilité de l'eau autre que celui employé précédemment. Il est égal au rapport des quantités d'eau perdues par la tranche inférieure de la colonne évaporante à celles perdues par la tranche supérieure.

L'étude effectuée a confirmé et précisé l'importance de la texture. Elle a notamment permis de mettre en évidence le rôle prépondérant de la composition de la phase fine ($< 20\ \mu$) pour les sols minéraux. Dans le cas des sols humifères, la matière organique peut constituer un facteur de résistance plus ou moins important suivant sa nature (matière organique brute ou évoluée) et suivant l'humidité du sol.

Dans les terres de culture, où la fraction humifiée est généralement importante, le rapport $\frac{\text{Limon fin } (2\text{-}20\ \mu)}{\text{Argile } (< 2\ \mu)}$ donne une meilleure indication sur la mobilité de l'eau que la composition granulométrique du sol.

Les débits d'évaporation sont fonction à la fois de la mobilité de l'eau et de l'humidité volumique du sol. La transposition de ces données à l'étude de l'évapotranspiration d'un couvert végétal ne peut se faire que dans le cas où l'offre est inférieure à la demande.

Enfin, il y a lieu de souligner le peu d'informations que l'on possède sur l'importance du facteur mobilité de l'eau par rapport aux autres paramètres de l'alimentation hydrique des plantes. Les conditions expérimentales de nos essais, caractérisés par des débits d'évaporation importants, expliquent l'éventail très ouvert des valeurs de la mobilité pour les différentes terres. Il n'est pas sûr que les débits d'extraction de l'eau au niveau de la surface de contact racine-sol soient aussi grands. D'autre part, la distance de 10 cm représentant la longueur de nos colonnes n'est-elle pas très supérieure au trajet moyen de la molécule d'eau pour atteindre la racine ? Cela est

vraisemblable dans le cas d'un bon enracinement. Ainsi, le « poids » du paramètre mobilité de l'eau est peut-être plus faible que ne le laisseraient supposer les résultats de laboratoire.

*Reçu pour publication en décembre 1970.*

## SUMMARY

STUDY ON THE MOBILITY OF UNSATURATED WATER IN COLUMNS OF SOIL SUBJECTED TO EVAPORATION. EFFECTS OF THE TEXTURE AND THE ORGANIC-MATTER CONTENT

Vary different types of soil columns were subjected to surface evaporation over a period from 8 hours to 6 days. To evaluate the mobility of water an index was put forward and is calculated from the water profiles taking into account the ratio of the volume of water lost by the lower half of the column to that lost by the upper. The effects of both texture and organic matter are fully gone into. This study has evinced that in arable land where the humified fraction of organic matter is usually large, the ratio $\frac{\text{loam } (2\text{-}20\ \mu)}{\text{clay } (< 2\ \mu)}$ shows pretty well the value of the mobility of water. The latter depends largely on the size distribution of the small particles but varies slightly with the proportion of such small particles to the coarse ones. The resulting data also show that the rate of evaporation depends both on the mobility of water and absolute humidity of the soil. A method for processing these data is put forward with a view to going further into as to how the water is supplied to the plants dependently on climatic conditions.

## ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER MOBILITÄT DES NICHT SÄTTIGENDEN WASSERS IN DER VERDUNSTUNG UNTERWORFENEN BODENSÄULEN. EINFLÜSSE DER TEXTUR UND DES GEHALTES AN ORGANISCHEM MATERIAL

Säulen aus feuchten, sehr verschiedene Beschaffenheit aufweisenden Böden wurden einer Oberflächenverdunstung unterworfen : die Dauer der Behandlungen betrug zwischen 8 Stunden und 6 Tagen. Um die Mobilität des Wassers zu bestimmen wurde ein Index vorgeschlagen, der von den hydrolytischen Bodenprofilen ausgehend und das Verhältnis der in dem unteren und oberen Säulenabschnitt verlorenen Wassermengen berücksichtigend berechnet wird.

Die Einflüsse der Textur und des organischen Materials wurden präzisiert. Die Untersuchung zeigte folgende Ergebnisse : für die Kulturböden, wo die humifizierte Fraktion des organischen Materials im allgemeinen beträchtlich ist, gibt die Beziehung : $\frac{\text{Lehm } (2\text{-}20\ \mu)}{\text{Ton } (< 2\ \mu)}$ einen befriedigenden Hinweis für den Wert der Wassermobilität. Dieser Wert hängt in der Tat in sehr starkem Masse von der Verteilung der Grösse der feinen Elemente ab. Er ändert sich jedoch wenig mit dem Verhältnis der feinen Elemente im Vergleich mit den groben Elementen. Die festgestellten Ergebnisse zeigen schliesslich, dass der Verdunstungsgrad von der Wassermobilität und ebenfalls von der Feuchtigkeit je Volumeneinheit des Bodens abhängt.

Eine Ausnutzung dieser Ergebnisse für ein besseres Verständnis der Modalitäten der hydrolytischen Pflanzenversorgung in Abhängigkeit von den klimatischen wird vorgeschlagen.

## РЕЗЮМЕ

*Изучение подвижности ненасыщающей влаги в колонах почвы подверженной испарению. Влияние текстуры и содержания органического вещества.*

Ж. МОРИЗЭ, Р. МИЙЕ.

Увлажненные почвы разной природы подвергались поверхностному испарению в колонках : длительность этой обработки была от 8-ми часов до 6-ти дней. Для оценки подвижности влаги был предложен показатель рассчитывавшийся на основании водного профиля, при помощи отношения об'ема влаги потерянного нижней частью колонки к об'ему испаренному верхней ее частью. Уточнены были влияния текстуры и органического вещества. Из этих тестов следует что для окультуренных почв, в которых гуминовая фракция органического вещества занимает крупное место, соотношение $\frac{\text{суглинок } (2-20\,\mu)}{\text{глина } (2\mu)}$ дает достаточно верное указание подвижности влаги. И действительно, подвижность эта находится в большой зависимости от распределения величин мелких частичек, но мало изменяется с изменением пропорций этих частичек, по отношению к частичкам крупных размеров. Полученные результаты показывают также, что величина испарения зависит в одно и тоже время и от степени подвижности влаги, и от об'емной влажности почвы. Авторы предлагают метод обработки этих данных для лучшего понимания форм водного питания растенний, в зависимости от климатических условий.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAVER L. D. *Soil Physics*, 3e édition, p. 253.

FÉODOROFF A., BÉTRÉMIEUX R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ. *Sci. Sol*, 2e sem., 109-118.

HADAS A., 1964. Deviations from Darcy's law for the flow of water in unsaturated soils. *Israël J. agron. Res.* **14**, 159-168.

HALLAIRE L., HÉNIN S., 1958. Dessèchement du sol et évolution des profils hydriques. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2151-2153.

HALLAIRE M., 1963. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **14** (4), 393-428.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG Colette, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13** (1), 55-63.

MORIZET J., 1967. Étude de la circulation de l'eau non saturante dans différentes terres en régime de dessèchement. *Ann. agron.*, **18** (3), 267-283.

PUECH J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

PUECH J., 1969. Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'interprétation des débits. *Ann. agron.*, **20** (5), 505-516.

RAFI M., 1964. Contribution à l'étude de l'évaporation du sol nu. *Revue de géographie Physique et de Géologie dynamique*. Paris, **6** (2) (Thèse du 3e cycle).

SWARTZENDRUBER D., 1963. Non-Darcy behavior and the flow of water in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 491-495.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (2), 213-239.

# ÉTUDE INTÉGRÉE DE LA DÉCOMPOSITION D'APPORTS ORGANIQUES DANS LE SOL

## Évolution du carbone et de l'azote, liaison a la fraction minérale, modification des propriétés physiques.

Ph. GRAFFIN

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

---

## RÉSUMÉ

L'auteur a étudié sur plusieurs mois dans les conditions du laboratoire, l'évolution aérobie de produits végétaux caractéristiques (paille, ray-grass jeune, fumier fait) mélangés à de la terre en présence ou non d'azote minéral.

Les résultats obtenus confirment tout d'abord un certain nombre de données usuelles sur la minéralisation. En même temps, l'utilisation de certains critères, taux de remaniement de la matière organique sous forme libre, taux de liaison à la fraction minérale, pouvoir stabilisateur des produits liés fait apparaître le phénomène de décomposition sous un aspect nouveau qui permet de rendre compte de la transformation de la matière organique en produits liés à la fraction minérale.

L'ampleur du remaniement de la matière organique libre, variable selon le type d'apport reste toujours supérieure à celle de la minéralisation et, dans tous les cas, il y a une fixation effective à la fraction minérale. Ces phénomènes se manifestent au cours des premières semaines d'incubation ; après une période de deux à quatre mois, l'évolution se stabilise. On constate alors que le remaniement n'est pas total : il est de 90 p. 100 pour le ray-grass, 80 p. 100 pour la paille, 37 p. 100 pour le fumier. Les teneurs en produits liés à la fraction minérale sont respectivement de 25 p. 100 pour le ray-grass, 30 p. 100 pour la paille, 17 p. 100 pour le fumier.

Dans le cas du ray-grass et du fumier, à la différence de ce qu'on observe en présence de paille, les phénomènes microbiens ne sont pas les seuls à intervenir dans le processus de liaison.

En outre, si ces produits sont relativement stables biologiquement, il est montré, dans le cas de la paille, qu'ils ne peuvent être assimilés à de l'humus au sens dynamique du terme.

Enfin, au niveau de leur action sur les propriétés physiques (la stabilité structurale), on constate que ces produits liés n'obéissent pas à une règle d'efficacité de valeur générale. Seule la paille donne lieu à une amélioration de stabilité. Mais comparée à ce qu'on obtient avec des apports plus importants, celle-ci apparaît moins que proportionnelle.

En comparant les traitements paille et ray-grass, il apparaît que le type de constituant qu'implique une teneur élevée en azote minéralisable ne donne pas naissance à des produits actifs sur la stabilité structurale au cours de leur décomposition.

---

## INTRODUCTION

On connaît aujourd'hui l'importance déterminante des matières organiques sur les propriétés et le comportement physique des sols. Toutefois, les travaux qui ont porté sur ces sujets ont surtout permis de mettre en évidence les principaux modes d'action générale des constituants organiques sans toujours préciser les mécanismes particuliers à tel ou tel apport. Ainsi, il arrive que des faits observés dans la pratique soient en contradiction au moins apparente avec les résultats obtenus au laboratoire, ce qui souligne le caractère particulier de ces derniers et partant la difficulté de généraliser.

En étudiant l'action des matières organiques sur la stabilité structurale, MONNIER (1965) avait mis en évidence un mécanisme d'action générale : la diminution de mouillabilité d'agrégats de terre par suite de la liaison (1) à la fraction minérale de produits issus de la décomposition d'apports organiques dans le sol. Ce phénomène avait pour conséquence une amélioration des propriétés physiques du sol.

Dans la pratique cependant, il arrive que des apports de matière organique ne s'accompagnent pas pour le sol ou pour la plante d'effets bénéfiques mesurables. En dehors même d'une action favorable sur les rendements, des apports de paille, d'engrais vert ou de fumier, ne paraissent pas modifier les propriétés physiques dans le sens d'une amélioration.

Dans ces conditions, il nous a paru nécessaire de parvenir à une meilleure connaissance des phénomènes qui prennent naissance lorsqu'on incorpore des produits organiques dans le sol.

Puisque MONNIER avait montré le rôle déterminant sur les propriétés physiques des produits qui se lient à la fraction minérale, nous avons pensé qu'il fallait essayer de suivre le processus de liaison au cours de la décomposition. En rassemblant en effet une série de mesures concernant cet aspect du phénomène ainsi que les réactions qui l'accompagnent, on pouvait espérer mettre en évidence le ou les mécanismes par lesquels la matière organique se fixe sur la fraction minérale. C'est la démarche que nous avons adoptée.

Après une série de mises au point techniques, nous avons entrepris une expérience sur la décomposition de produits organiques dans le sol. Celle-ci fait l'objet de la présente publication.

Dans les conditions du laboratoire, nous avons suivi l'évolution dans le sol de trois apports organiques typiques : de la paille, du fumier, de l'engrais vert. L'étude a porté à la fois sur le carbone et sur l'azote et a concerné les points suivants : vitesse de remaniement et de minéralisation, liaison à la fraction minérale, évolution de l'azote minéral et modification de la stabilité structurale.

(1) A partir d'observations sur les matières organiques du sol, HÉNIN et TURC (1949) proposaient de distinguer deux fractions : l'ensemble des composés organiques liés à la fraction minérale — la matière organique liée — d'autre part, l'ensemble des débris animaux et végétaux non liés au support minéral — la matière libre. Ils proposaient une méthode de séparation de la matière organique libre par fractionnement densimétrique.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. — *Matériel*

*Sol.*

La terre utilisée provient de l'horizon d'accumulation (horizon B) d'un sol limoneux de la région de Versailles.

Ce matériau, homogène, à structure peu stable, pratiquement dépourvu de matière organique libre, contient une quantité de carbone liée à la fraction minérale à la fois très faible et très stable biologiquement. Les caractéristiques rapportées à la terre séchée à 105° sont reproduites dans le tableau 1.

TABLEAU 1

*Caractéristiques de l'horizon B*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Granulométrie des constituants minéraux | Argile granulométrique < 2 μ | 32,0 % | | |
| | Limon fin 2-20 μ | 40,5 % | | |
| | Limon grossier 20-50 μ | 20,0 % | | |
| | Sable fin 50-200 μ | 4,8 % | | |
| | Sable grossier 200-2 000 μ | 2,1 % | | |
| Matière organique | Carbone total | 3,8 ‰ | ± 0,1 | P 95 % |
| | Carbone de la MO liée | 3,5 ‰ | ± 0,1 | P 95 % |
| | Carbone de la MO libre | 0,29 ‰ | ± 0,04 | P 95 % |
| | Azote total | 0,610 ‰ | ± 0,007 | (δ/2) |
| Stabilité structurale | Agrégats stables à l'eau après prétraitement : Alcool | 11 % | ± 1 | P 95 % |
| | Benzène | 2 % | ± 1 | P 95 % |
| | Air | 8 % | ± 1 | P 95 % |
| Rétention de l'eau | Humidité pondérale à la capacité au champ | 25 % | | |
| | à p F 4,2 | 10 % | | |

L'homogénéité du matériau en regard des grandeurs mesurées au cours de l'expérience a été estimée satisfaisante.

*Matières organiques apportées.*

L'horizon B a reçu un apport de 2 p. 100 de matière organique sèche. Celle-ci était constituée soit de paille d'orge séchée et broyée (200-500 μ), soit de fumier séché et broyé (200-500 μ) soit de ray-grass jeune (limbes apportés à l'état frais en brins de 1-2 mm).

Les teneurs respectives en carbone et en azote de ces matières organiques sont indiquées au tableau 2.

*Apport d'azote minéral.*

L'horizon B a reçu en outre des quantités variables d'azote ammoniacal. Dans une première série, la dose apportée correspond à celle qui paraît agir sur la vitesse de décomposition. C'est une dose de sécurité. Pour le ray-grass et le fumier, nous avons admis que l'absence d'azote ammoniacal n'était pas facteur limitant de la décomposition. Aussi, l'apport dans ces traitements a-t-il été nul. Par contre, dans le cas de la paille, étant donné la faible teneur en azote de ce produit et compte tenu de travaux antérieurs (SIMON-SYLVESTRE, 1960), nous avons apporté une quantité qui correspond à 12 kg d'azote par tonne de paille.

Dans une seconde série, l'apport d'azote est calculé de façon à ramener à 5 le rapport C/N des produits incorporés dans le sol. C'est une dose d'opulence.

La composition élémentaire initiale des six mélanges, (correspondant aux trois traitements MO à deux doses d'azote) est résumée dans le tableau 3. Les colonnes du groupe I se rapportent à la composition élémentaire de l'ensemble (terre + MO + apport N) de chaque mélange au début de l'expérience. Dans les colonnes du groupe II figurent les quantités de carbone et d'azote apportées à la terre, y compris l'azote minéral.

TABLEAU 2

*Composition élémentaire des matières organiques apportées*

| Matières organiques apportées | Teneur en p. 1 000 du produit séché à 105° | | |
|---|---|---|---|
| | C (Anne) | N (Kjeldahl) | C/N |
| Paille d'orge ..... | 429 | 3,8 | 113 |
| Fumier ..... | 357 | 24,6 | 14,5 |
| Limbes de ray-grass jeunes. | 329 | 31 | 10,6 |

B. — *Méthodes*

*Dispositif de fermentation.*

Afin de se placer en conditions de fermentation aérobie, l'horizon B, préalablement tamisé à 200-2 000 μ est humecté par vaporisation jusqu'à l'humidité de la capacité au champ (25 p. 100 en humidité pondérale). La solution utilisée contient 1 p. 1 000 de la solution saline de Winogradski et les quantités convenables d'azote ammoniacal sous forme de sulfate d'ammonium. Les différents apports organiques sont ensuite incorporés progressivement à la terre humide pour former six mélanges d'environ 1 kg chacun. La totalité de chaque mélange est placée dans un seul tube de fermentation. Le renouvellement de l'atmosphère interne est obtenu par un courant d'air d'un débit convenable, préalablement privé de $CO_2$ et saturé d'eau. A la sortie de chaque tube, on adapte un absorbeur de $CO_2$ rempli de chaux sodée. Enfin, les tubes sont placés dans une pièce où la température est maintenue à 20°. L'ensemble est complété par deux tubes témoins d'horizon B humidifié à la capacité au champ, l'un sans azote, l'autre avec apport d'azote ammoniacal.

*Contrôle des conditions de fermentation.*

Le contrôle de l'humidité est assuré de deux façons : d'une manière globale, sans ouverture des tubes par simple pesée après déconnectage du système d'aération ; sur des prises ponctuelles à l'occasion des prélèvements. On constate qu'à l'intérieur des tubes l'humidité est homogène, d'autre part, elle reste sensiblement constante dans le temps.

Le contrôle de la température a été effectué par enregistrement, le capteur étant placé à proximité des tubes, mais à l'extérieur de ceux-ci. La température que l'on voulait maintenir à 20° est en réalité restée comprise entre 19 et 22°C.

*Prélèvements et répétitions des mesures.*

Un point zéro de la fermentation a été établi sur échantillons prélevés juste après incorporation de la matière organique à la terre humide. Les dosages de carbone (6 répétitions) et d'azote (3 répétitions) par leur reproductibilité satisfaisante nous ont assuré de l'homogénéité des mélanges au départ de la fermentation. Ce sont ces valeurs moyennes du point zéro qui figurent au tableau 3.

Au cours de l'expérience, des prélèvements sont effectués de façon régulière et en tenant compte de l'activité biologique (dégagement de $CO_2$). Les tubes sont vidés avec précaution sur un plateau, échantillonnés sur chaque tiers de la hauteur puis remplis avec la terre restante et rebranchés sur le dispositif d'aération. Le carbone et l'humidité sont mesurés sur trois prises, l'azote total et l'azote minéral sur une seule.

TABLEAU 3

*Composition des mélanges et quantités apportées à l'horizon B*

| N° | Types de mélange | I Teneurs totales de chaque mélange | | | II Quantités apportées à l'horizon B | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Composition | C °/oo | N °/oo | C/N | C °/oo | N °/oo | C/N |
| 1 | Horizon B + paille + dose d'azote minéral forte | 12,0 | 2,26 | 5,3 | 8,2 | 1,65 | 5 |
| 2 | Horizon B + paille + dose d'azote minéral faible | 11,8 | 1,03 | 11,5 | 7,9 | 0,38 | 21 |
| 3 | Horizon B + fumier + dose d'azote minéral forte | 10,8 | 2,05 | 5,2 | 7,0 | 1,43 | 4,9 |
| 4 | Horizon B + fumier sans apport d'azote minéral | 10,7 | 1,05 | 10,2 | 6,9 | 0,48 | 14,5 |
| 5 | Horizon B + ray-grass + dose d'azote minéral forte | 12,3 | 2,32 | 5,3 | 8,4 | 1,72 | 4,9 |
| 6 | Horizon B + ray-grass sans apport d'azote minéral | 12,7 | 1,46 | 8,7 | 8,8 | 0,85 | 10,6 |

Les prélèvements — exception faite pour le dosage d'azote minéral — sont ensuite mis à sécher dans une étuve climatique à 4°, ventilée par un courant d'air sec pour arrêter brutalement la fermentation sans modifier la stabilité structurale, ce que provoquerait un séchage à 105° (MONNIER et KONAN, 1968).

*Méthodes de mesures.*

Les quantités de $CO_2$ dégagé au cours de la fermentation sont mesurées par variation de poids des tubes absorbeurs à chaux sodée, le courant d'air ayant été préalablement desséché sur du perchlorate de magnésium. Le carbone est dosé selon la méthode Anne (1945, action du mélange sulfochromique) ; le fractionnement densimétrique des matières organiques est opéré par centrifugation dans un mélange alcool-bromoforme de densité 2 (MONNIER *et al.*, 1962). L'azote total est dosé suivant la méthode Kjeldahl. L'azote minéral, extrait sur échantillon frais par agitation avec KCl N, est dosé, pour l'azote ammoniacal par $H_2SO_4$ 0,01 N après entraînement à la vapeur en présence de MgO calciné ; sur le même extrait et avec les mêmes réactifs, pour l'azote nitrique, après réduction à l'état ammoniacal par l'alliage Dewarda.

La stabilité structurale est évaluée suivant la méthode Hénin (HÉNIN *et al.*, 1958).

*Fiabilité des mesures effectuées sur les mélanges.*

De façon générale, pour chaque prélèvement, on constate que pour les trois prises ponctuelles provenant de niveaux différents, les valeurs du carbone total, du carbone libre et du carbone lié varient peu. Face à ces critères, la fermentation a donc été homogène. En outre, il y a une concordance étroite entre plusieurs séries de résultats. D'une part, les variations ponctuelles du carbone total sont en bon accord avec les quantités de carbone dégagées sous forme de $CO_2$ : l'écart n'excède pas 5 p. 100. D'autre part, il y a un bon accord entre la somme carbone libre + carbone liée mesurée sur une prise à un niveau donné du tube et la valeur du carbone total mesuré sur une autre prise au même niveau : l'écart ne dépasse pas non plus 5 p. 100.

*Expression des résultats.*

L'homogénéité de la fermentation et l'ajustement de la minéralisation ponctuelle à la minéralisation globale nous ont permis d'utiliser les résultats pour établir les critères suivants qui nous semblent bien caractériser l'évolution de la matière organique :

*a*) Le taux de remaniement de l'apport à un instant donné, $TR_t$, soit :

$$TR_t = \frac{\text{Carbone apporté} - \text{Carbone libre au temps } t}{\text{Carbone apporté}}$$

Le carbone apporté est représenté par le carbone total du mélange au temps zéro diminué du carbone total de l'horizon B. Le numérateur de ce rapport représente la quantité de carbone de l'apport qui, au temps $t$ n'est plus sous forme libre. Nous dirons que c'est la partie de l'apport qui a été remaniée.

*b*) Le taux de minéralisation de l'apport à un instant donné, $TM_t$, soit :

$$TM_t = \frac{\text{Carbone total du mélange au temps zéro} - \text{Carbone total du mélange au temps } t}{\text{Carbone apporté}}$$

Le numérateur représente en réalité la diminution de carbone total du mélange entre l'instant zéro et l'instant $t$. Mais cette quantité nous l'avons vu correspond au carbone minéralisé et dégagé sous forme de $CO_2$.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. — ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

#### 1. — *Évolution de la matière organique de l'horizon B*

Les résultats relatifs aux deux témoins contenant l'horizon B seul ont permis de vérifier la stabilité de la matière organique de l'horizon B. On constate en effet au tableau 4, que le carbone total ne varie pratiquement pas au cours du temps, en presence comme en absence d'azote minéral.

TABLEAU 4

*Évolution de la valeur indiciaire du carbone total des témoins*

| Caractéristiques des témoins | Temps d'incubation | | |
|---|---|---|---|
| | 0 j | 100 j | 200 j |
| Témoin horizon B humidifié à 25 p. 100 sans apport de matière organique ni d'azote .... | 100 | 98 | 97 |
| Témoin horizon B humidifié à 25 p. 100 sans apport de matière organique avec apport de 800 p.p.m. d'azote ammoniacal ..... | 100 | 98 | 98 |

Nous avons admis que cette stabilité n'était pas modifiée par un apport de matières organiques. Ceci nous a permis de considérer dans les calculs les caractéristiques de la matière organique de l'horizon B (carbone libre et carbone lié) comme des constantes. Ainsi, lorsque le carbone total, le carbone libre ou le carbone lié des mélanges varie au cours du temps, nous avons imputé ces variations à la seule évolution du carbone apporté sous forme de paille, de ray-grass ou de fumier.

2. — *Évolution de la matière organique des mélanges* (fig. 1)

1. *Le carbone.*

En considérant les trois résultats portant sur le carbone, taux de remaniement, taux de minéralisation, teneur en carbone lié à la fraction minérale, on constate que pour chaque apport les résultats diffèrent très peu d'une dose d'azote à l'autre. Au tableau 5 sont rapportés les résultats relatifs au remaniement et à la minéralisation.

Cette observation précise et confirme les conclusions de SIMON-SYLVESTRE (1960) relatives à la minéralisation de la paille et leur donne une portée plus générale. A partir d'un certain seuil d'azote minéral, la vitesse de décomposition, le taux final de décomposition et la transformation en matière organique liée ne sont pas modifiées en présence de quantité supplémentaire d'azote minéral. Ainsi, pour le ray-grass et le fumier, ce seuil d'azote correspond ici à des apports nuls. Dans le cas de la paille, on n'enregistre pas de modifications pour des apports d'azote supérieurs à 13 kg d'azote minéral par tonne de matière sèche.

Cet aspect général étant précisé, nous examinerons seulement en détail les résultats concernant les doses faibles ou nulles d'azote minéral.

a) *Carbone de la matière organique libre.*

Pour chaque apport, le rendement et la minéralisation (cf. fig. 1) varient à peu près de la même façon. Dans le cas de la paille et du ray-grass, on distingue nettement trois phases de remaniement : sitôt réalisée l'incorporation de la matière organique à la terre, une période d'activité élevée s'étendant sur trois semaines, puis une période de ralentissement et enfin une période d'activité faible mais non nulle. L'intensité du remaniement pour ces différentes phases est indiquée au tableau 6.

Pour une période donnée, les intensités sont du même ordre de grandeur, alors que d'une période à l'autre, elles sont entre elles comme des puissances de 10.

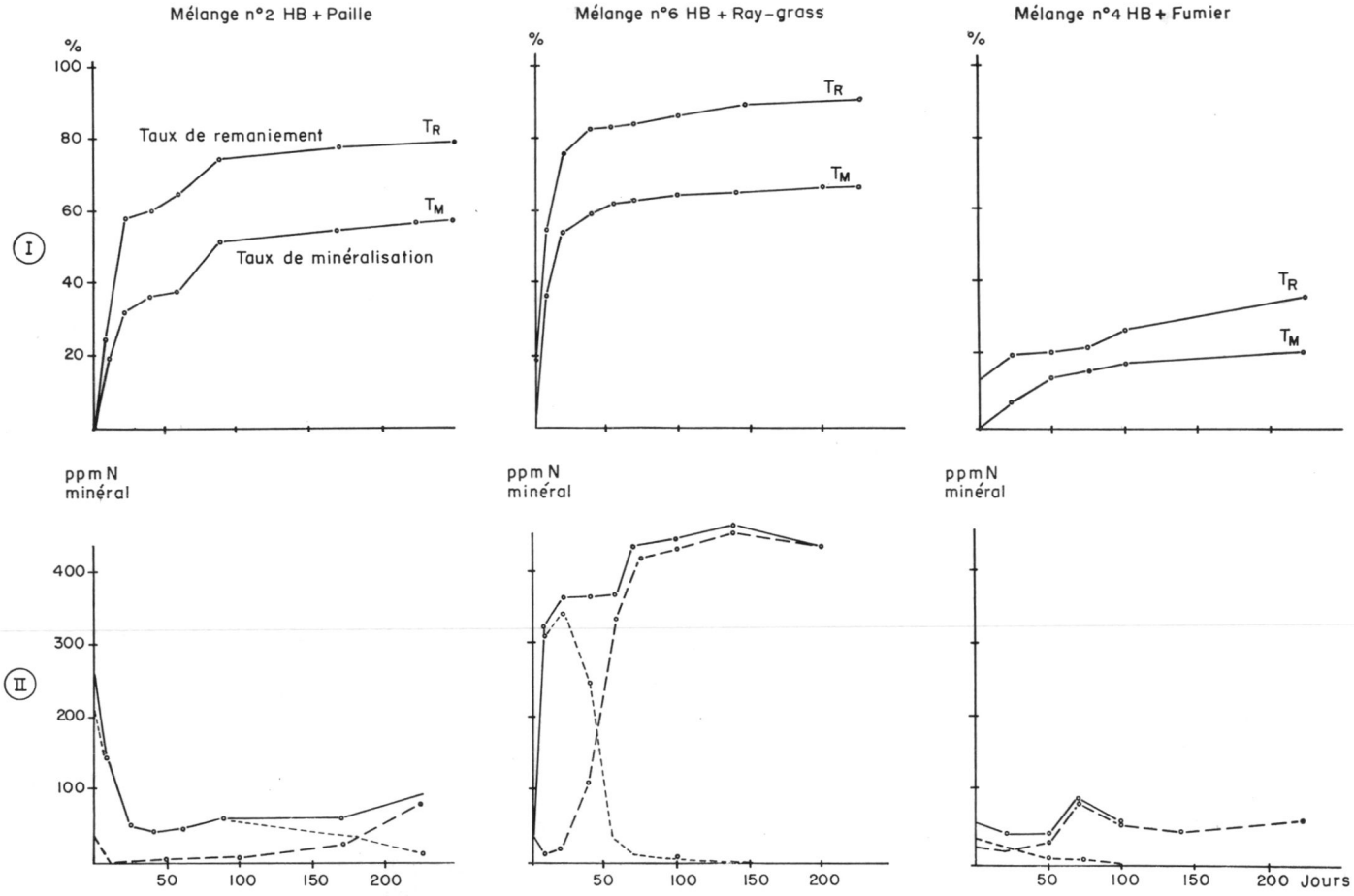



FIG. 1. — *Évolution comparée des mélanges terre + apport organique en fonction du temps*

I : Taux de remaniement TR et Taux de minéralisation TM de l'apport
II : Teneur en azote minéral p. 1 000 de mélange terre + apport :
---- $N - NH_4$ o——o $N - NO_3$ ·——· $N - NH_4 + N\text{-}NO_3$

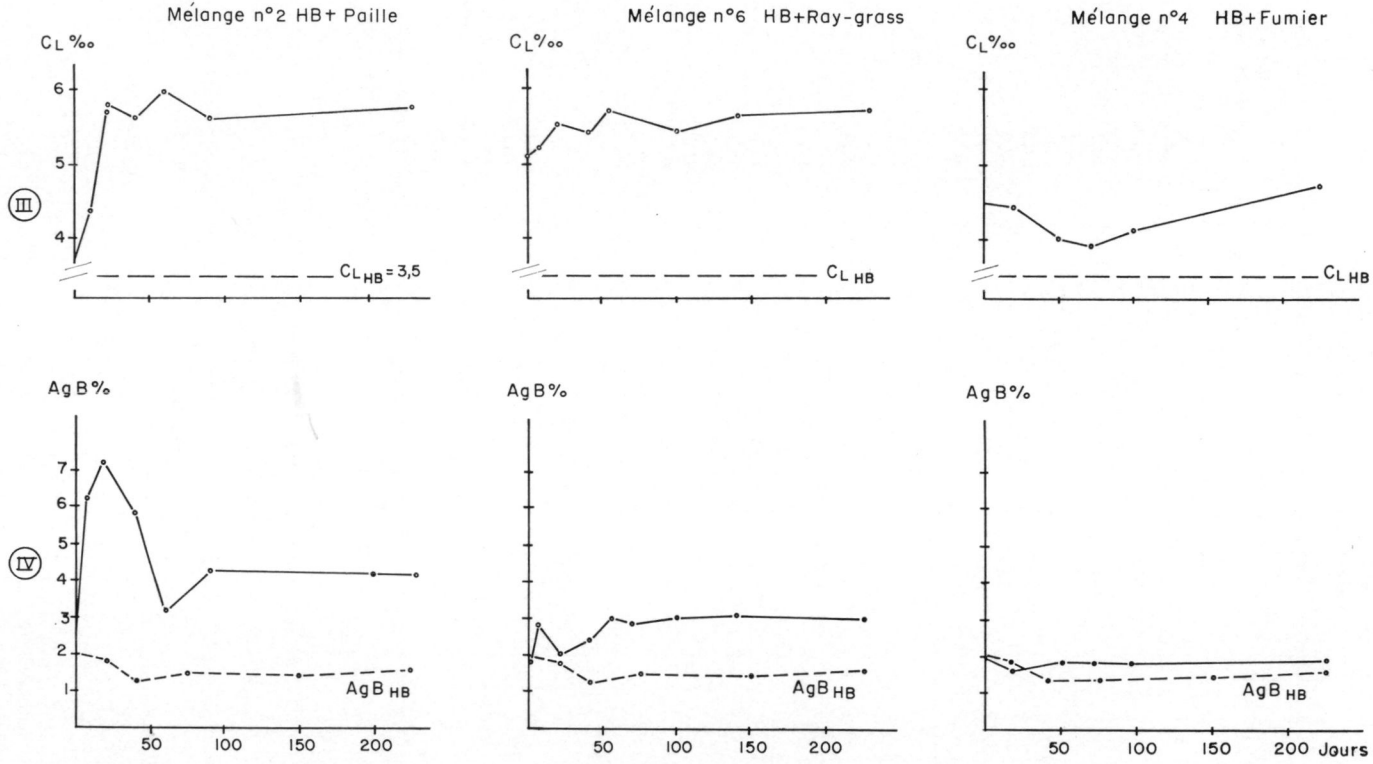



FIG. 1. — *(Suite)*

III : Quantité de carbone liée à la fraction minérale en p. 1 000 du mélange terre + apport
IV : Pourcentage d'agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène en p. 100 du mélange terre + apport

TABLEAU 5

*Remaniement et minéralisation comparée des mélanges suivant les deux doses d'azote apportées*

| Désignation des mélanges | Taux de remaniement ($TR_t$ en %) | | Date de prélèvement | Taux de minéralisation ($TM_t$ en %) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | mélange n° 1 | mélange n° 2 | jours | mélange n° 1 | mélange n° 2 |
| Horizon B + 2 % de paille | 3,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 30,0 | 25,2 | 8 | 20,2 | 18,9 |
| | 57,5 | 57,5 | 22 | 28,7 | 32,6 |
| | 61,5 | 60,0 | 40 | 39,9 | 37,7 |
| | 65,5 | 65,2 | 60 | 41,0 | 39 |
| | 72,5 | 74,5 | 87 | 52,0 | 52 |
| | 75,5 | 78,2 | 169 | 52,2 | 54,3 |
| | 76,5 | 79 | 231 | 56,5 | 57,5 |
| | mélange n° 5 | mélange n° 6 | jours | mélange n° 5 | mélange n° 6 |
| Horizon B + 2 % de ray-grass | 14,3 | 16,7 | 0 | 0 | 0 |
| | 58,5 | 55,0 | 7 | 37,6 | 36,6 |
| | 81,0 | 75,5 | 20 | 55 | 53,5 |
| | 84,5 | 82,2 | 38 | 62,7 | 59,5 |
| | 87,5 | 83,5 | 54 | 64 | 61,5 |
| | 88 | 84,2 | 69 | 64,5 | 63,2 |
| | 89 | 85,5 | 98 | 66,7 | 64,5 |
| | 90 | 89,5 | 138 | 68,2 | 65,5 |
| | | | 199 | 69,2 | 66 |
| | 91 | 90,0 | 220 | 69 | 69 |
| | mélange n° 3 | mélange n° 4 | jours | mélange n° 3 | mélange n° 4 |
| Horizon B + 2 % de fumier | 12,5 | 13,3 | 0 | 0 | 0 |
| | 23,2 | 20 | 23 | — | 6,7 |
| | 24,0 | 20,6 | 49 | 8,1 | 14 |
| | 26,0 | 22,1 | 72 | 15,6 | 16,6 |
| | 30,0 | 28 | 98 | 18 | 18 |
| | 30,5 | — | 140 | 19,2 | 19,3 |
| | 35 | 37 | 220 | 21,5 | 20 |

TABLEAU 6

*Intensité de remaniement au cours des différentes phases d'activité*

| Phases d'activité | Intensité du remaniement p. 100 de l'apport | |
|---|---|---|
| | Ray-grass | Paille |
| **1.** Période d'activité élevée .... | 2,9 p. 100/j | 2,6 p. 100/j |
| **2.** Période de ralentissement ... | 0,37 p. 100/j | 0,25 p. 100/j |
| **3.** Période d'activité faible .... | 0,04 p. 100/j | 0,03 p. 100/j |

Pour ces deux apports, le remaniement final est élevée : 79 p. 100 pour la paille, 90 p. 100 pour le ray-grass. Mais il aura été plus rapide pour le ray-grass, puisque, à 40 jours, il atteint déjà 0,9 fois la valeur finale alors que c'est seulement à 90 jours que la même fraction du remaniement final est obtenu pour la paille.

L'apport de fumier présente quant à lui une évolution différente, de caractère plus continu. Le remaniement final est nettement plus faible, 37 p. 100, mais non négligeable, ce qui est important à noter pour un produit qui a déjà subi une longue décomposition. D'autre part, l'intensité du remaniement présente des variations plus atténuées : 0,3 p. 100 par jour pendant les 20 premiers jours ; 0,08 p. 100 par jour au-delà si on ne retient qu'une seule période pour l'intervalle 20-220 jours. Mais surtout, en ne tenant pas compte du remaniement de 13 p. 100 constatée sitôt réalisé le mélange terre + fumier, c'est 70 p. 100 de la valeur finale du remaniement qui est acquis au cours d'une phase de décomposition faible.

L'essentiel du remaniement s'opère donc en condition lente pour un apport de fumier, en condition rapide pour un apport de paille ou de ray-grass.

D'autre part, considéré à l'échelle d'une année, le taux de remaniement s'identifie au coefficient $\alpha$ de disparition de la matière organique sous forme libre utilisée dans la formule de HÉNIN *et al.* (1959) proposée pour rendre compte de l'évolution des matières organiques dans le sol. Par extrapolation des points expérimentaux, on trouve les valeurs suivantes pour $\alpha$ : 0,9 pour le ray-grass, 0,8 pour la paille, 0,45 pour le fumier. Le remaniement ne serait donc pas total au bout d'un an et il s'en faudrait de beaucoup pour le fumier.

*Quant à la minéralisation*, on peut faire la même constatation que pour le remaniement : l'essentiel se produit en période de décomposition rapide, sauf pour le fumier. Durant cette période de grande activité, l'intensité de la minéralisation présente un pic caractéristique (fig. 2). En fin d'expérience, la vitesse de minéralisation, quoique beaucoup plus faible que dans les premières semaines est encore supérieure à celle de l'humus au sens dynamique du terme : elle équivaut en effet à un taux de minéralisation annuelle de 12 p. 100.

b) *Carbone de la matière organique liée à la fraction minérale.*

*Dans le cas de la paille*, le carbone lié correspond initialement à celui de l'horizon B. Il s'élève pendant la période de décomposition intense, varie faiblement ensuite et se stabilise à partir de trois mois. En fin d'expérience, le taux de liaison du carbone à la fraction minérale est de 29 p. 100, ce qui correspond à un rendement final de transformation $\left(\frac{\text{quantité liée}}{\text{quantité remaniée}}\right)$ de 37 p. 100, valeur sensiblement moins élevée qu'en début de fermentation (50 p. 100 au début du palier de liaison, à 20 jours).

*Dans le cas du ray-grass*, on constate d'abord que le carbone lié mesuré à l'issue de l'incorporation du ray-grass est nettement supérieur à celui de l'horizon B (+ 1,5 p. 1 000, soit 17 p. 100 du ray-grass). Il s'élève ensuite assez faiblement au cours des 50 premiers jours et ne varie que très peu au-delà de cette date. En fin d'expérience, le taux de liaison est de 25 p. 100, pour un rendement de transformation de 27 p. 100, valeur sensiblement plus faible que dans le cas de la paille.

*Dans le cas du fumier* enfin, on remarque également que le carbone lié, sitôt réalisé le mélange, est supérieur à celui de l'horizon B (+ 1 p. 1 000). La quan-

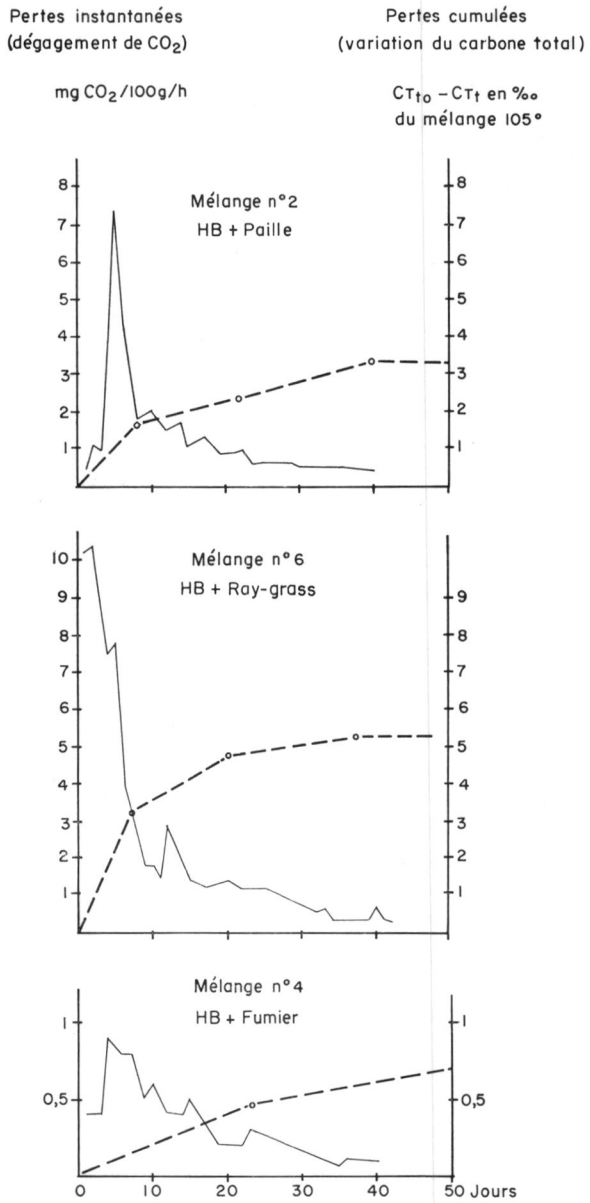



FIG. 2. — *Diminution de la teneur en carbone des mélanges : pertes instantanées et pertes cumulées*
——— dégagement de $CO_2$
——o—— variation du carbone total

tité de produit lié diminue ensuite au cours des deux premiers mois puis se relève progressivement. En fin d'expérience, à sept mois, le taux de liaison, de 17 p. 100 correspond à un rendement de transformation de 47 p. 100. On remarquera que durant les deux premiers mois, période où la teneur en carbone lié s'abaisse, l'écart entre le taux de remaniement et le taux de minéralisation diminue.

En définitive, après sept mois de fermentation, une fraction de chaque apport se trouve liée à la fraction minérale à un niveau qui paraît bien stabilisé, tout au moins pour la paille et le ray-grass ; soit 29 p. 100 pour la paille ; 25 p. 100 pour le ray-grass ; 17 p. 100 pour le fumier.

Si l'on cherche à comparer ces résultats à des données dont on dispose par ailleurs et que l'on se réfère par exemple au coefficient isohumique, on constate (tabl. 7) qu'ils diffèrent des valeurs généralement admises pour ce coefficient, pour la paille et surtout pour le ray-grass. Pour ces deux apports, le taux de liaison est supérieur au coefficient isohumique.

TABLEAU 7

*Taux de liaison et coefficient isohumique*

| | Taux de liaison | | Coefficient isohumique MONNIER (1965) |
|---|---|---|---|
| Paille ..... | 0,29 | Pailles de céréales ..... | 0,08 à 0,20 |
| Fumier ..... | 0,17 | Fumier ..... | 0,15 à 0,45 |
| Ray-grass ..... | 0,25 | Engrais vert..... | voisin de 0 |

En fait, la mise au point suivante est nécessaire : coefficient isohumique et taux de liaison ne concernent pas *a priori* les mêmes produits, tout au moins ceux qu'ils désignent ne sont pas définis de la même façon. Dans un cas, le taux de liaison à la fraction minérale se rapporte à des produits définis essentiellement par leurs conditions de dosage : carbone organique d'un culot de centrifugation débarrassé du liquide organique de séparation. Statistiquement, on sait qu'un tel carbone correspond à de la matière organique évoluée, à C/N bas. D'un autre côté, le coefficient isohumique caractérise la transformation en produits évolués et biologiquement stables, leur taux de minéralisation annuelle étant de l'ordre de 1 à 2 p. 100.

Or, dans le dispositif expérimental adopté, il n'est pas possible à partir des seules mesures portant sur le carbone, d'évaluer la vitesse de minéralisation de la matière organique liée. On n'a pas la preuve que le taux de liaison soit un estimateur correct du coefficient isohumique et on ne peut pas pour le moment, porter de jugement sur la nature humique des produits fixés.

Néanmoins, on peut affirmer qu'au cours de la décomposition des apports considérés, des produits organiques se fixent à la fraction minérale à des taux relativement supérieurs à ce que laissent prévoir les coefficients humiques admis et de façon stable, sans toutefois connaître de façon précise leur vitesse de minéralisation. A cet égard, on ne peut pas les assimilier *a priori* à de l'humus au sens dynamique du terme.

2. *L'azote.*

Au cours de la décomposition, l'azote total reste constant. En milieu aérobie et en l'absence de drainage, ceci est normal et constitue, on le sait, une particularité du cycle de l'azote dans le sol. Pour caractériser son évolution on a alors considéré la teneur en azote minéral. Les mélanges ayant reçu des doses faibles ou nulles d'azote permettent de faire les observations suivantes :

a) *Dans le cas de la paille,* trois périodes sont à distinguer : une importante organisation d'abord, au cours d'une période de courte durée (— 200 p.p.m. en 20 jours), puis un palier, enfin une minéralisation lente (+ 40 p.p.m. entre le 50e et le 220e jour). Au bout de sept mois, 160 p.p.m. sur les 250 initiaux sont encore immobilisés, soit 80 p. 100 du maximum immobilisé (au 20e jour). L'azote immobilisé au début de la décomposition n'est donc que faiblement libéré au cours des mois qui suivent.

D'autre part, au maximum d'immobilisation la teneur en azote minéral n'est pas nulle (45 p.p.m.) : la dose de sécurité a donc joué effectivement son rôle et l'azote minéral n'est pas facteur limitant de la décomposition dans les conditions de l'expérience puisqu'une certaine quantité reste disponible.

D'un point de vue qualitatif, durant la période d'organisation, l'azote minéral restant demeure sous la forme ammoniacale qui était celle de l'apport. Ce n'est qu'au cours de la minéralisation que la nitrification se manifeste ; en fin d'expérience, l'azote minéral est essentiellement sous forme nitrique.

Enfin, durant la période d'activité élevée des 20 premiers jours, période où se fait l'essentiel de la liaison à la fraction minérale, le rapport C/N du remaniement (quantité de carbone remanié rapportée à la quantité d'azote organisé) est de 19. Cette valeur se décompose en fait en deux termes plus spécifiques : d'une part le coût énergétique apparent de l'organisation de l'azote soit 8 unités de carbone minéralisé par unité d'azote organisé ; d'autre part, la richesse moyenne en azote des produits liés à la fraction minérale : 11 unités de carbone par unité d'azote.

*Évolution comparée du carbone et de l'azote après apport de paille.*

Si on regroupe maintenant les résultats relatifs au carbone et à l'azote après incorporation de la paille à la terre (fig. 3), on aboutit aux conclusions suivantes :

Au cours des trois premières semaines, un remaniement élevé de l'apport s'accompagne de la liaison à la fraction minérale de produits organiques et d'une organisation importante de l'azote minéral présent initialement dans le milieu.

Ces éléments mettent en évidence de façon précise la formation en présence d'une activité microbiologique élevée, de matière organique d'un type nouveau à partir d'un matériau de départ pauvre en azote et non lié à la fraction minérale. L'identification de ces produits de néoformation montre qu'ils sont riches en azote (leur rapport C/N est de 11) et fixés à la fraction minérale.

Au cours d'une seconde période, un ralentissement du remaniement et un palier de fixation coïncide avec des teneurs en azote minéral sensiblement constantes. Enfin, un remaniement faible mais persistant et un palier de fixation s'accompagnent d'une minéralisation progressive d'azote.

Les produits élaborés au cours de la première période paraissent donc relativement stables biologiquement. Ils subissent néanmoins dans le temps une évolution marquée par une minéralisation progressive de l'azote : 15 p. 100 de l'azote fixé au bout de trois semaines se trouvent minéralisés sur une période de six mois. Ce résultat

comparé au taux de minéralisation annuel de 1 à 2 p. 100 généralement admis pour l'azote humique par les agronomes montre que les produits de néoformation dont il est question ne peuvent pas être assimilés à de l'humus.

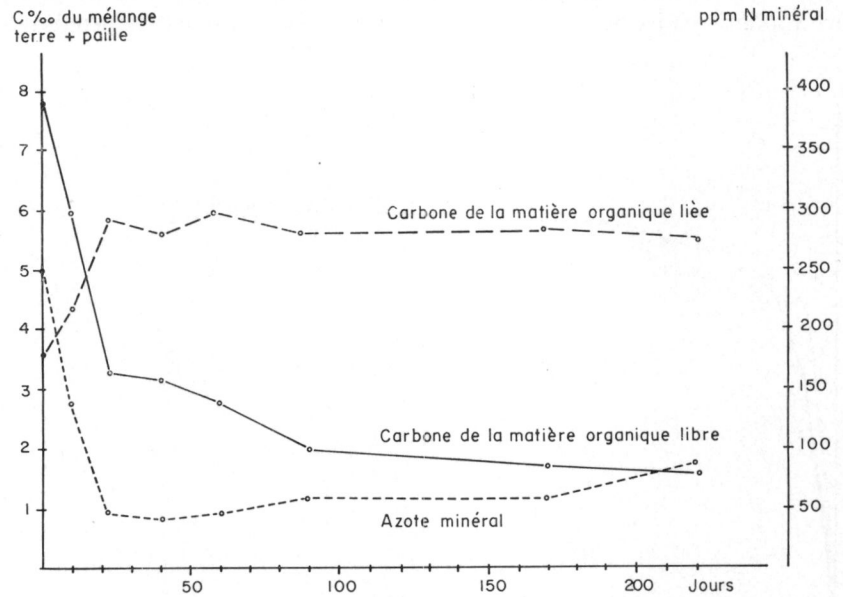



FIG. 3. — *Évolution comparée du carbone et de l'azote après apport de paille en présence d'azote ammoniacal* (mélange n° 2)

L'indétermination entre coefficient isohumique et taux de liaison se trouve donc levée. Mais par voie de conséquence, le coefficient isohumique paraît impropre à caractériser l'évolution de produits organiques, tout au moins l'année qui suit leur incorporation. Il exclut en effet des produits ayant une existence propre, présents en quantité importante, relativement stables de surcroît. Il serait donc souhaitable de pouvoir faire figurer un poste de substances pré-humiques dans un bilan de décomposition.

*b*) *Dans le cas du ray-grass*, l'évolution de l'azote se caractérise par une minéralisation très importante. Celle-ci se manifeste avec une très forte intensité dès le début de la fermentation, elle marque ensuite un palier au cours des 2e et 3e mois, reprend à nouveau et marque un palier dans le dernier mois.

Après sept mois, 50 p. 100 de l'azote du ray-grass se retrouvent sous forme minérale. C'est du moins ce qu'on mesure. En fait, il faut tenir compte de la quantité retenue par les argiles au cours de l'ammonification, quantité que nous avons évaluée par référence à la fixation irréversible d'apports d'azote ammoniacal à l'horizon B. Le taux réel de minéralisation serait alors de 65 p. 100.

D'un point de vue qualitatif, la minéralisation intense des premières semaines est essentiellement une ammonification. Dans la période suivante, l'évolution apparemment nulle au niveau de l'azote minéral total se traduit en fait par la transformation quasi totale de l'azote ammoniacal en azote nitrique. Par la suite, la teneur en azote ammoniacal demeure négligeable.

Comparées l'une à l'autre, la minéralisation du carbone et celle de l'azote présentent de grandes similitudes : activité initiale intense (au rythme moyen de la première semaine, la minéralisation du carbone et de l'azote serait pratiquement totale au bout de 3 semaines), ralentissement et activité finale faible. A cet égard, la figure 4 montre clairement que les taux de minéralisation sont très peu différents.

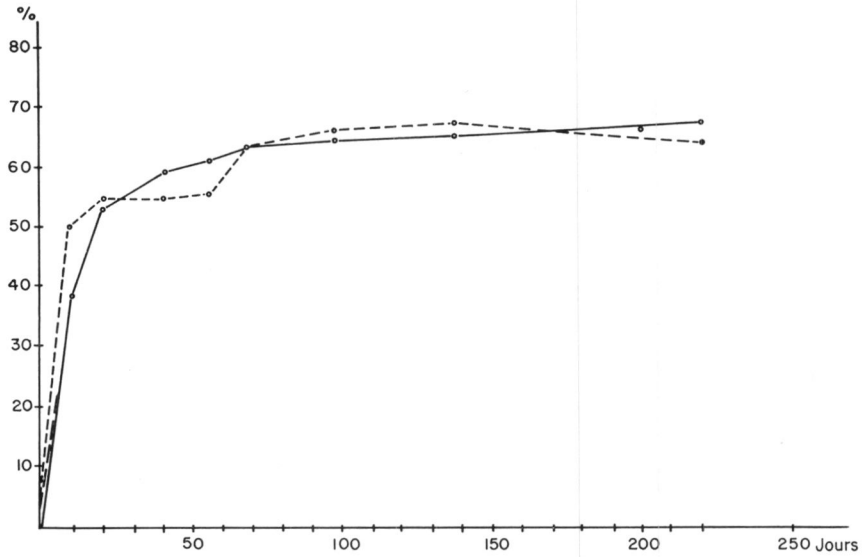



FIG. 4. — *Minéralisations comparées de l'azote et du carbone du mélange n° 6, HB + Ray-grass*
o———o carbone minéralisé/carbone de l'apport en p. 100
— — o — azote minéralisé corrigé/azote de l'apport en p. 100

Sur ce graphique, le décrochement du taux de minéralisation de l'azote enregistré après trois semaines correspond à la période de transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique. Compte tenu de la reprise de minéralisation observée ensuite, on peut penser qu'une telle transformation implique parallèlement l'organisation d'une certaine quantité d'azote minéral. C'est du moins ce que suggère l'évolution de l'azote minéral dans l'horizon B enrichi en azote ammoniacal (fig. 5).

En définitive, une décomposition très rapide marquée par une minéralisation importante de l'azote et du carbone et la fixation stable de produits organiques à la fraction minérale (prolongeant une fixation immédiate par simple contact avec la terre) constituent les traits dominants de l'évolution du ray-grass.

c) *Dans le cas du fumier*, l'évolution de l'azote tout comme celle du carbone est beaucoup moins marquée que pour la paille et le ray-grass. Après une minéralisation faible et rapidement amortie, la teneur finale en azote minéral n'est que légèrement supérieure à la valeur initiale et correspond à la minéralisation de 2 p. 100 de l'azote du fumier, soit un taux annuel de 3,5 p. 100.

Au cours des deux premiers mois, la diminution du carbone lié et l'augmentation de l'azote minéral mettent en évidence la minéralisation partielle des produits mobiles qui s'étaient liés dès la réalisation du mélange terre-fumier. Par la suite,

l'augmentation du carbone lié et la réorganisation de l'azote libéré dénotent, par contre, la formation de produits liés.

En définitive, à en juger par la minéralisation de l'azote, l'apport de fumier

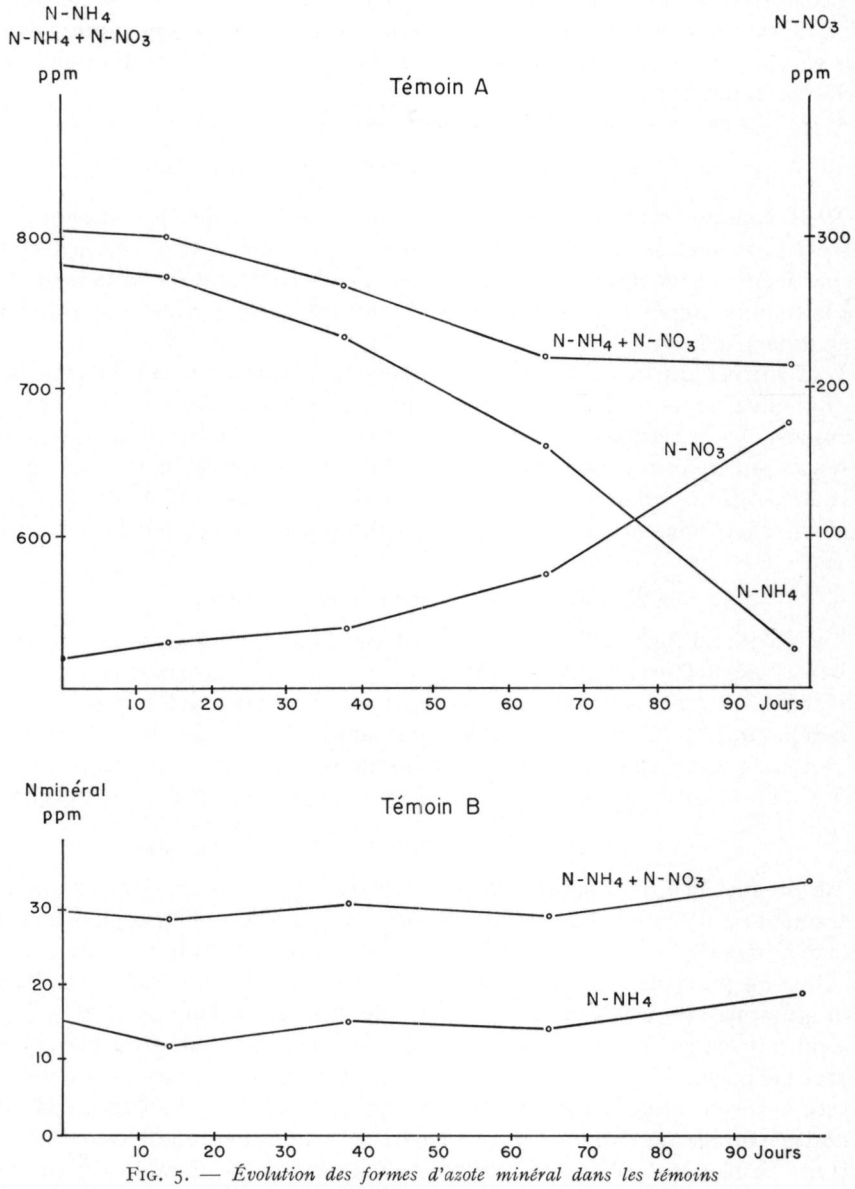



FIG. 5. — *Évolution des formes d'azote minéral dans les témoins*
Témoin A : HB + $N\text{-}NH_4$ humidifié à 25 p. 100, incubé à 20°
Témoin B : HB pur humidifié à 25 p. 100, incubé à 20°

présente un comportement assez proche de produits humiques vrais. *A priori*, ce résultat n'est pas surprenant puisqu'il s'agit de « fumier bien fait » donc d'un produit qui a déjà subi une longue évolution. Mais ce que montre surtout l'évolution du

fumier, du moins telle que nous l'avons abordée, c'est qu'un apport de matières organiques évoluées — peu différentes vraisemblablement de la matière organique du sol, évoluée et liée à la fraction minérale — n'aboutit que dans une faible mesure à lier celles-ci à la fraction minérale. De ce point de vue, il semble nettement préférable de ne pas différer hors du sol l'évolution des apports organiques. C'est du moins ce qui ressort de notre expérience quand on compare l'évolution de la paille et celle du fumier.

### B. — Évolution de la stabilité structurale

Nous considérerons seulement ici les pourcentages d'agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène — notés AgB p. 100 dans le texte. Ce critère est en effet particulièrement indiqué pour rendre compte de l'action de la matière organique liée à la fraction minérale lorsqu'on étudie l'aptitude du sol à résister aux actions de dégradation par l'eau.

L'expérience que nous avons de ce test nous permet en outre d'interpréter de la façon suivante les variations d'AgB p. 100 : pour les faibles valeurs (4 p. 100 et en dessous), les variations ne sont significatives d'une amélioration que pour des différences supérieures à une unité p. 100. Pour un matériau donné, en effet, une variation d'AgB p. 100 supérieure à une unité p. 100 est un seuil à partir duquel on enregistre effectivement au champ une modification du comportement vis-à-vis de l'eau.

#### 1. — *Évolution de la stabilité dans les témoins*

Les valeurs d'AgB restent sensiblement constantes, voisines de 2 p. 100. C'est une valeur très faible. Compte tenu de la teneur en sables grossiers ($\varphi > 200\ \mu$) de l'horizon B, soit 2 p. 100, et du tamisage à 200 $\mu$ opéré au cours du test de stabilité elle indique que l'agrégation résiduelle après action de l'eau est nulle.

Notons que ce comportement au laboratoire est caractéristique d'un grand nombre de sols cultivés, de texture limoneuse et pauvres en matières organiques.

#### 2. — *Évolution de la stabilité dans les mélanges*

En premier lieu, il apparaît que, pour chaque apport, les résultats varient très peu d'une dose d'azote à l'autre. Cela étant, on constate que le comportement du mélange à base de fumier ne se distingue pas de celui du témoin : aucune amélioration. Il en est pratiquement de même pour le mélange à base de ray-grass, l'amélioration qui apparaît en fait étant à la limite de la signification.

Seul le mélange à base de paille se distingue très nettement du témoin et des 2 autres mélanges. L'évolution de la stabilité est dans ce cas particulièrement intéressante à suivre : elle comprend d'abord un pic qui s'étend sur toute la période d'évolution rapide du carbone, puis à partir de 3 mois et durant toute la période d'activité faible, un palier qui traduit une amélioration durable des propriétés physiques.

*a*) Durant les 3 premiers mois, les variations d'AgB sont étroitement liées à celles de la vitesse de minéralisation du carbone, critère qui, comme on le sait, caractérise l'activité respiratoire des microorganismes (fig. 6). Toutefois, on ne retrouve pas ici le décalage très net dans le temps observé par Meredith (1965) entre l'acti-

vité respiratoire et la modification des propriétés physiques ; ici le caractère différé ne se manifeste pas. Ce qui apparaît, par contre, très clairement, c'est le caractère transitoire d'un effet physique apparu à l'occasion d'un développement très important de la microflore du sol.

D'un point de vue qualitatif, la diminution de mouillabilité des agrégats de terre se manifeste de façon très nette. On vérifie de plus qu'elle affecte presque exclusivement leur surface : une goutte d'eau déposée sur la tranche de l'un de ces agrégats fraîchement coupé est absorbée très rapidement, alors qu'elle reste sans modification lorsqu'on la dépose sur les zones externes.

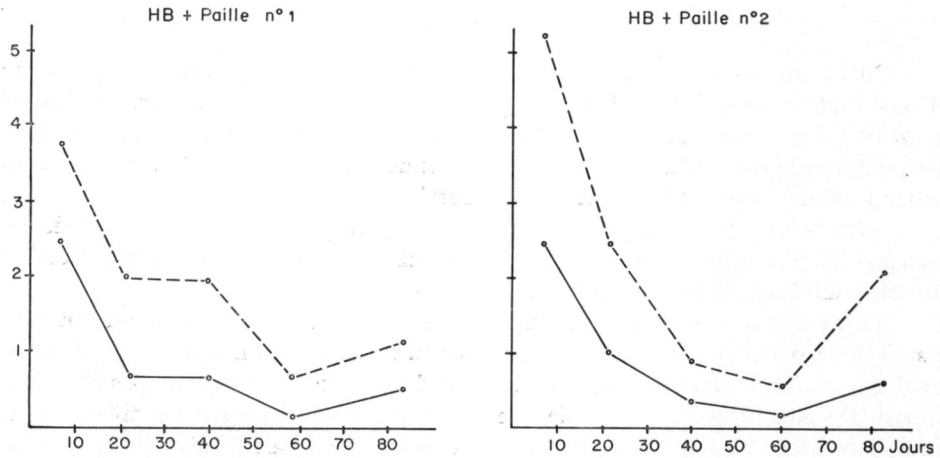



FIG. 6. — *Pouvoir stabilisateur et vitesse de décomposition dans les mélanges à base de paille*

o - - - o pouvoir stabilisateur : $\frac{\text{AgB (en unités p. 100)}}{\text{C lié (en unités p. 1 000)}}$

o——o vitesse de minéralisation : pourcentage du carbone total apporté minéralisé en moyenne, par jour de la période précédent le prélèvement

*b*) De trois mois à sept mois, alors que l'activité respiratoire est très faible, les valeurs d'AgB restent néanmoins supérieures à celles du témoin. Il s'agit là, MONNIER l'a montré, de l'effet propre des produits de décomposition liés à la fraction minérale. Leur efficacité spécifique :

$$\frac{\text{augmentation d'agrégats stables au benzène } (\Delta \text{ AgB p. 100})}{\text{augmentation de la teneur en carbone lié } (\Delta \text{ C}_\text{L} \text{ p. 1 000})} \simeq 1$$

s'avère plutôt faible par rapport aux valeurs supérieures à 10 qu'indiquait MONNIER, pour des apports, il est vrai, plus importants.

En définitive, l'évolution de la stabilité structurale des mélanges à base de paille confirme les résultats de MONNIER, mais en apportant toutefois deux précisions importantes. D'une part, la stabilité structurale fluctuante observée au cours des premiers mois de décomposition s'avère étroitement liée à l'intensité des phénomènes microbiens, d'autre part, le pouvoir stabilisateur $\left(\text{soit le rapport } \frac{\Delta \text{ AgB}}{\Delta \text{ C}_\text{L}}\right)$ des matières organiques fraîchement liées s'avère nettement plus faible lorsque celles-ci sont présentes en petites quantités.

Cela étant, en pratique on doit s'attendre à une intensité des phénomènes

microbiens moins élevée et cela au moins pour plusieurs raisons : température, humidité, mais surtout masse et conditionnement de la paille. A cet égard, MEREDITH a clairement mis en évidence l'effet dépressif sur l'activité des microorganismes d'apport de pailles de plus en plus grossiers. D'autre part, eu égard aux quantités apportées, la quantité de produits fixés à la fraction minérale sera en valeur absolue très faible. Ainsi, la fixation à la fraction minérale d'une quantité de produits organiques équivalent à 30 p. 100 d'un apport de 4 tonnes de pailles par hectare, répartie sur les 3 000 tonnes de terre d'une couche de 20 cm amènerait une augmentation de la teneur en carbone lié de l'ordre de 0,1 unité de carbone pour mille de terre.

### 3. — *Comparaison entre les différents mélanges*

On l'a vu, les mélanges à base de fumier et de ray-grass ne présentent pas d'amélioration de stabilité. Pourtant, vis-à-vis de facteurs dont on connaît l'action, il serait raisonnable d'attendre un effet positif en relation, soit avec l'activité de la fermentation que traduit le pic de dégagement de $CO_2$, soit avec la liaison contractée entre produits organiques et matières minérales.

Dans le cas du fumier, il est vrai, le pic de dégagement de $CO_2$ est très peu marqué. Mais il reste à expliquer l'absence d'effets physiques malgré la liaison à la fraction minérale de produits organiques.

On remarque alors que la quantité fixée est inférieure à celle qu'on obtient à partir de la paille : en supposant que ces produits liés aient un pouvoir stabilisateur analogue, l'effet obtenu avec le fumier aurait donc toute chance de ne pas être significatif. De plus, il est très possible que ces produits soient de nature différente. Le fumier contient en effet des produits humiques, et on sait le peu d'efficacité des acides humiques fixés sur l'horizon B comparée à celle de substances préhumiques fixés au cours de la fermentation de paille (MONNIER, 1968).

Enfin, la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus avec du fumier amène une autre remarque. Si on tient compte de la quantité de paille que représente virtuellement le fumier fait, l'apport de 2 p. 100 de fumier apparaît comme un apport de 10-12 p. 100 de paille dont on aurait différé hors du sol, dans certaines conditions, la plus grande partie de l'évolution. Ce qui est certain, c'est qu'avec un apport de 10 p. 100 de paille, on obtiendrait des effets considérables (MONNIER, 1965) tant du point de vue de la fixation que de la stabilité structurale. De ces deux points de vue, il paraît donc bien préférable d'apporter le produit brut fermentescible plutôt que son produit de décomposition. En l'occurrence, le fait que ce dernier ne se détruise que lentement au cours du temps, ne constitue pas un avantage particulier.

Dans le cas du ray-grass, il n'y a pas d'amélioration de stabilité malgré une fermentation intense et la liaison de produits organiques à la fraction minérale.

On peut évidemment attribuer cette discordance à des conditions expérimentales telles que : effets de très courte durée, mauvais contact matière organique-sol. Ces objections, la dernière en particulier, ne semblent pas pertinentes car dans une expérience ultérieure effectuée avec un ray-grasss plus âgé et de même conditionnement, nous avons constaté une augmentation de stabilité structurale très nette (pic et amélioration résiduelle). L'explication la plus vraisemblable est que le type de matières organiques résultant de la fermentation de ray-grass très jeune n'est

pas susceptible d'accroître la stabilité structurale, ce qui met implicitement en cause la nature des produits soumis à la décomposition. Dans cette optique, le ray-grass très jeune et la paille représentent deux stades végétatifs extrêmes des graminées. Or, on connaît l'existence de relation entre la composition du tissu et l'âge des végétaux. Dans le cas du ray-grass, JARRIGE (1960) a nettement mis en évidence cette variation de la composition au cours du développement.

Il résulte de cette constatation, qu'une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans ces phénomènes demanderait une étude chimique plus poussée des produits résultant de l'activité microbiologique. Il apparaît en effet qu'il ne suffit pas qu'une matière organique soit liée à la fraction minérale pour qu'elle ait un effet sur la stabilité structurale, encore faut-il qu'elle réponde à certains critères chimiques qui restent à définir. On peut toutefois conclure d'après les résultats comparés de la paille et du ray-grass que les matières organiques actives sur la stabilité se forment par décomposition de plantes relativement âgées, ce qui implique qu'elles contiennent dans leurs tissus des proportions relativement élevées de cellulose et/ou de lignine (tabl. 8).

TABLEAU 8

*Compositions comparées de la paille et du ray-grass jeune*

| Composition du ray-grass jeune en p. 100 de la matière sèche (JARRIGE, 1960) | | Composition moyenne des pailles de céréales (POCHON et BARZAC, 1958) | |
|---|---|---|---|
| Cendres | 9,6 | Éléments minéraux | 10 |
| Extrait aqueux | 37 | Hydrosoluble | 10 |
| Extrait au dégraissage | 9 | Graises et résines | 2 |
| Hémicellulose | 12 | Hémicellulose | 18-30 |
| Cellulose | 14 | Cellulose | 32-40 |
| Lignine | 2 | Lignine | 12-15 |
| Indéterminé | 18 | Protéine | 2 |

## C. — SYNTHÈSE DES RÉSULTATS (fig. 7)

### 1. — *Évolution de la matière organique*

En premier lieu, il apparaît que le remaniement des apports n'est pas total au bout d'un an : il reste de la matière organique sous forme libre après la période d'activité microbienne élevée qui suit l'incorporation des matières organiques dans le sol. De l'ordre de 80 à 90 p. 100 pour la paille et le ray-grass, le remaniement n'atteindrait pas 50 p. 100 pour le fumier au bout d'un an. Ces résultats, le dernier en particulier, sont vérifiés dans la pratique.

En second lieu, les produits qui se lient à la fraction minérale de façon stable représentent un pourcentage faible quoique variable (15 à 30 p. 100) de l'apport initial. Dans le cas de la paille, on établit de plus que les produits de néoformation fixés, quoique riches en azote et relativement stables biologiquement ne peuvent pas être assimilés directement à de l'humus : leur vitesse de minéralisation est en fait supérieure à celle de cette substance. Aussi serait-il souhaitable de pouvoir introduire un poste préhumique pour tenir compte des substances nouvellement fixées et encore susceptibles d'évoluer.

| Apport | Critères de l'évolution | Échelle des temps (jours) 0 — 20 — 40 — 60 — 80 — 100 — 150 — 200 | | | Bilan final après 7 mois Valeurs approchées |
|---|---|---|---|---|---|
| Paille + N minéral | Remaniement de la M. O. (C) | Remaniement important et rapide | Remaniement modéré | Remaniement faible | Taux de remaniement 80 % |
| | N minéral | Organisation élevée | Palier | Légère minéralisation | Immobilisation de l'azote : 80 % du maximum |
| | Liaison de la M. O. (C) à la fraction minérale | Liaison progressive | Légères fluctuations | Palier > témoin | Taux de liaison 30 % |
| | Stabilité structurale (AgB) | Augmentation | Diminution | Palier > témoin | Amélioration de stabilité |
| Ray-grass | Remaniement de la M. O. (C) | Remaniement important et très rapide | Remaniement faible | | Taux de remaniement 90% |
| | N minéral | Minéralisation élevée | Palier — Minéralisation — Palier | | Minéralisation N 50-60 % N ray-grass |
| | Liaison de la M. O. (C) à la fraction minérale | Liaison immédiate et maintenue | Légères fluctuations en hausse palier > témoin | | Taux de liaison 25 % |
| | Stabilité structurale (Ag B) | | Comportement peu différent du témoin HB | | (Amélioration de stabilité ?) |
| Fumier | Remaniement de la M. O. (C) | Remaniement modéré | (Palier) | Remaniement faible | Taux de remaniement 37 % |
| | N minéral | N minéral stable | ↗ | ↘ légère minéralisation | Minéralisation N 3,5 % N fumier |
| | Liaison de la M. O. (C) à la fraction minérale | Liaison immédiate maintenue | Diminution | Liaison progressive | Taux de liaison 17 % |
| | Stabilité structurale (AgB) | | Comportement non différent du témoin HB | | Pas d'amélioration de stabilité |

FIG. 7. — *Récapitulation. Évolution comparée des différents mélanges : HB ayant reçu 2 p. 100 de paille, de ray-grass ou de fumier*

Parallèlement à ces constatations, l'évolution du produit végétal pauvre en azote (la paille a un rapport C/N de 110) se traduit par l'organisation durable d'une partie de l'azote minéral présent dans le milieu au moment de l'incorporation. Cette fraction qui équivaut ici à 25 kg d'azote par tonne de carbone remanié correspond à 8 p. 100 du carbone qui se fixe sur la fraction minérale.

En présence du végétal jeune, riche en azote (le ray-grass a un rapport C/N de 10), on assiste à une minéralisation très importante de cet élément : en trois mois, le sol se trouve enrichi en azote nitrique suivant une quantité qui correspond à plus de 50 p. 100 de l'azote contenu dans le ray-grass.

Avec le fumier, produit ayant déjà subi une décomposition, on observe aussi en fin de compte une minéralisation d'azote. Mais elle est beaucoup plus faible : de l'ordre de 3 p. 100 de l'azote total du fumier pour une période étendue à un an.

### 2. — *Mécanismes de fixation à la fraction minérale*

Quand on incorpore dans le sol des matières organiques sous forme solide, les particules se juxtaposent dans un premier temps aux agrégats de terre, sans se lier à ceux-ci. Au cours du temps, sous des conditions convenables de température et d'humidité, une évolution se manifeste, marquée simultanément par la diminution de la matière organique sous forme non liée — ce que nous avons appelé le remaniement — et par la fixation à la fraction minérale de produits de néoformation. Tout au moins, ce caractère est-il mis en évidence dans le cas de la paille. Pour cet apport, le mécanisme de fixation est essentiellement sous la dépendance de phénomènes microbiens. Cette fixation, qui s'établit progressivement, atteint assez rapidement un palier.

Dans le cas du ray-grass et du fumier, on a, par contre, l'assurance que les phénomènes microbiens ne sont pas les seuls à intervenir. On constate en effet que par simple contact avec la terre humide, il y a fixation d'une certaine quantité de produits organiques. Par la suite, en présence de ray-grass, l'intense activité microbienne modifie peu l'importance de cette fixation initiale. En présence de fumier, les variations de la teneur en produits liés qu'on enregistre au cours du temps sont en relation avec l'activité microbienne.

### 3. — *Actions sur les propriétés physiques*

Enfin, l'action sur les propriétés physiques — en l'occurrence, la stabilité structurale — qui était étudiée en même temps que la décomposition des matières organiques conduit à nuancer les résultats établis dans des conditions comparables (Monnier, 1965).

D'une part la décomposition des matières végétales apportées n'amène d'amélioration que dans le cas de la paille. Si l'on enregistre bien un effet transitoire important, lié à l'activité de la microflore, l'efficacité résiduelle des produits liés est nettement plus faible quand ceux-ci sont présents en faible quantité. Tout se passe comme si les petits apports avaient une action plus réduite pour deux raisons : parce qu'ils donnent naissance à une quantité moindre de produits liés et parce que ceux-ci ont une activité spécifique plus faible.

D'autre part, l'apport de produits de décomposition — le fumier — n'a pas d'effets sensibles dans les conditions du laboratoire comparativement au produit

brut — la paille — bien qu'il y ait eu liaison avec la fraction minérale. Il faut également insister sur le fait que la proportion de produits liés est moins importante.

Par ailleurs, l'évolution du ray-grass comparée à celle de la paille suggère que l'efficacité des produits liés issus de la décomposition est conditionnée par la présence de certains constituants (hémicellulose, cellulose, lignine). En première approximation, il semble qu'il y ait incompatibilité entre les effets liés aux processus impliqués dans une fermentation jouant un rôle actif sur la stabilité et ceux ayant pour conséquence la libération d'azote minéral. Dans nos conditions expérimentales en effet, ou bien il y a action sur la stabilité structurale, ou bien il y a libération d'azote minéral dans le milieu.

D'après ces résultats, il semble donc, compte tenu des quantités de matière organique utilisées en pratique, que leur décomposition ne peut avoir qu'un effet direct limité sur la stabilité structurale. Il n'en est pas de même de l'action sur le cycle de l'azote qui apparaît comme devant être assez important pour certains types d'apport. Il n'en reste pas moins vrai que le rôle de quantités massives d'apports organiques sur une transformation rapide et importante des propriétés physiques ne doit pas être écarté. De telles situations existent, qu'il y ait mélange au sol ou simplement couverture.

## CONCLUSION

L'évolution de produits végétaux caractéristiques, paille, fumier fait, ray-grass jeune, étudiée dans les conditions du laboratoire, apporte une série de réponses aux problèmes posés par la transformation des matières organiques en présence de terre.

Les résultats obtenus mettent bien en évidence les différences modalités de décomposition ainsi que les réactions qui accompagnent ce phénomène.

D'une part, un certain nombre de données usuelles sur la minéralisation de l'azote et du carbone se trouvent confirmées et précisées.

D'autre part, l'utilisation de certains critères, taux de remaniement de la matière organique libre, taux de liaison à la fraction minérale, pouvoir stabilisateur des produits liés, fait apparaître la décomposition sous un aspect nouveau qui permet de rendre compte de la transformation de la matière organique apportée en produits liés à la fraction minérale, processus qui s'accompagne d'une modification des propriétés physiques du sol.

A cette occasion, deux mécanismes de fixation à la fraction minérale de produits organiques ont été identifiés dont l'un ne fait pas intervenir apparemment les phénomènes microbiens. Par ailleurs, au niveau des propriétés physiques, en l'occurrence, la stabilité structurale, on constate que les conséquences de cette fixation n'obéissent pas à une règle d'efficacité de valeur générale. La composition des produits apportés joue un rôle.

Du point de vue des méthodes, cette étude confirme l'intérêt de travailler à un niveau intermédiaire entre une étude biochimique fine sur produit spécifique et l'expérimentation en plein champ qui intègre l'ensemble des facteurs susceptibles

d'intervenir, mais ne permet de tabler que sur des bilans établis sur plusieurs années tant les variations sont faibles et l'hétérogénéité importante. Le dispositif expérimental adopté a permis de suivre au cours du temps l'évolution d'un milieu que nous pensons relativement proche des conditions naturelles et ce, semble-t-il, malgré certaines distorsions propres au modèle choisi (masse et conditionnement des apports, nature exclusivement microbienne de la faune du sol). L'étude intégrée des différents critères s'est avérée fructueuse. Elle a d'abord permis en combinant les résultats relatifs au carbone et à l'azote de caractériser plus complètement les différentes périodes de la transformation des matières organiques. Elle a ensuite permis de situer l'une par rapport à l'autre l'évolution de la matière organique et celle des propriétés physiques.

*Reçu pour publication en décembre 1970.*

## SUMMARY

COMPREHENSIVE STUDY ON THE DECOMPOSITION OF NATURAL MANURES IN THE SOIL. EVOLUTION OF CARBON AND NITROGEN ; BONDING WITH THE MINERAL FRACTION ; CHANGING PHYSICAL PROPERTIES

The author has investigated over several months, under laboratory conditions, the aerobic evolution of typical plant products, such as straw, young ray-grass, old manure, mixed with earth in presence or not of mineral nitrogen.

The results achieved corroborate some customary mineralization data. Concurrently, various criteria, *i. e.*, reworking rate of matter in free form, bonding rate with the mineral fraction, stabilizing capacity of the bonded products evince the decomposition phenomenon such as the conversion of organic matter into products bonded with the mineral fraction.

The extent to which the free organic matter is reworked, which varies with the organic supply is always greater than that of mineralization and, in all instances, effective fixation to the mineral fraction occurs. These phenomena develop over the first weeks of incubation, and stabilize after a period of two to four months. It is then found that reworking is not complete ; it amounts to 90 p. 100 for ray-grass, 80 p. 100 for straw, 37 p. 100 for manure.

The contents in products bonded to the mineral fractions are respectively 25 p. 100 for ray-grass, 30 p. 100 for straw and 17 p. 100 for manure.

Conversely to straw, microbian phenomena, instancing ray-grass and manure, are not the only ones to occur in the bonding process.

In addition, while these products are comparatively biologically stable, it is shown that, in the case of straw, they cannot be likened to humus in the dynamical sense.

Lastly, regarding their action on physical properties (structural stability) it is found that these bonded products do not comply with a steady rule of efficiency. Stability improves only with straw. However, when compared with the yield derived from more extensive supplies, such stability is apparently less than proportional.

When comparing the straw and ray-grass treatments, it appears that the type of constituent, which a high mineralizable nitrogen content implies, does not give rise to products taking effect on the structural stability during their decomposition.

## ZUSAMMENFASSUNG

INTEGRIERTE UNTERSUCHUNG DER ZERSETZUNG VON ORGANISCHEN ZUGABEN IM BODEN
EVOLUTION DES KOHLENSTOFFES UND DES STICKSTOFFES :
BINDUNG MIT DER MINERALISCHEN FRAKTION
VERÄNDERUNG DER PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN

Im Laufe mehrerer Monate untersuchte der Verfasser im Laboratoriumsmasstab die aerobische Evolution charakteristischer, mit Erde gemischter, pflanzlicher Stoffe (Stroh, junges fertiger Mist) in An- oder Abwesenheit von mineralischem Stickstoff.

Die erzielten Ergebnisse bestätigen zunächst eine gewisse Anzahl bekannter Angaben, die die Mineralisierung betreffen. Gleichzeitig lässt die Verwendung gewisser Merkmale : Umarbeitungsprozentsatz des organischen Materials im freien Zustand, Bindungsgrad mit der mineralischen Fraktion, Stabilisierungsvermögen der gebundenen Erzeugnisse — das Zersetzungsphänomen unter einem neuen Anblick erscheinen. So ist es möglich, die Umwandlung des organischen Materials in Stoffe, die mit der mineralischen Fraktion gebunden sind, zu erkennen.

Der Umfang der Umwandlung des freien organischen Materials, der je nach dem Typ der Zugaben wechselt, übertrifft immer denjenigen der Mineralisierung. In jedem Falle zeigt sich eine tatsächliche Fixierung mit der mineralischen Fraktion. Diese Erscheinungen treten im Laufe der ersten Inkubationswochen auf ; zwei bis vier Monate später tritt dann eine Stabilisierung ein, wonach man feststellt. dass die Umwandlung unvollständig ist : sie erreicht 90 p. 100 für Raygrass, 80 p. 100 für Stroh, 37 p. 100 für Mist. Die Prozentsätze an Stoffen, die mit der mineralischen Fraktion gebunden sind, entsprechend : 25 p. 100 für Raygrass, 30 p. 100 für Stroh, 17 p. 100 für Mist.

Im Falle von Raygras und Mist, zum Unterschiede mit den Beobachtungen bei Stroh — sind dir mikrobischen Erscheinungen nicht die einzigen, die in den Bindungsprozess eingreifen.

Es wurde ausserdem gezeigt, dass im Falle von Stroh, wenn diese Stoffe auch biologisch verhältnismässig stabil sind, eine Assimilierung mit dem Humus, im dynamischen Sinne des Begriffes, unmöglich ist.

Auf der Ebene ihrer Einwirkung auf die physikalischen Eigenschaften (die strukturelle Stabilität) wurde schliesslich festgestellt, dass diese gebundenen Stoffe einem Wirksamkeitsgesetz von allgemeinem Werte nicht gehorchen. Nur im Fall Stroh tritt eine Verbesserung der Stabilität ein. Verglichen jedoch mit den Ergebnissen mittels umfangreicherer Zugaben erscheint diese Verbesserung geringer als proportional.

Wenn man die Untersuchungen mit Stroh und Raygras vergleicht, so stellt man fest, dass der Bestandteiltypus, der einen beträchtlichen Gehalt an mineralisierbarem Stickstoff bewirkt, keine auf die strukturale Stabilität aktiv einwirkende Stoffe im Laufe ihrer Zersetzung hervorbringt.

## РЕЗЮМЕ

Интегрированное изучение состава органических подкормок почвы.

Эволюция углерода и азота : их связь с минеральной фракцией; изменение физических свойств почвы.

Ф. ГРАФФЭН.

В течении нескольких месяцев, автьор изучал в лабораторных условиях аэробную эволюцию характерных растительных продуктов (солома, молодой рай-грасс, перепревший навоз) смешанных с почвой, в присутствии или отсутствии минерального азота.

Полученные результаты, прежде всего, подтвердили некоторые общеизвестные данные о минерализации. И, вместе с тем, применение

некоторых новых критериев как степень переработки органического вещества в свободной форме, степень связи с минеральной фракцией, стабилизирующая сила связанных продуктов, открывает новые аспекты явления разложения, дающие представление о превращении органического вещества в продукты связанные с минеральной фракцией.

Об'емы переработки свободного органического вещества, меняющиеся в зависимости от способа внесения, всегда превышают размеры минерализации, при чем во всех случаях наблюдается эффективное закрепление минеральной фракцией. Явления эти наблюдаются в течении первых недель инкубации; затем, после двух или четырехмесячного периода, эволюция стабилизируется. И тогда можно отметить что переработка не была полной : 90 % в случае рай-грасса, 80 % для соломы и 37 % для навоза. Содержания-же продуктов связанных с минеральной фракцией представляют соответственно 25 % (рай-грасс), 30 % (солома), и 17 % (навоз).

В отличие от наблюдающегося в присутствии соломы, в случае рай-грасса и навоза не одни только микробиальные явления принимают участие в процессе связывания.

Кроме того, даже если эти продукты являются биологически относительно прочными, особенно в случае соломы, их нельзя рассматривать как гумус в динамическом смысле слова.

И наконец, на уровне их влияния на физические свойства почв (прочность структуры), нужно отметить что эти связанные продукты, вобщем неэффективны. Только солома вызывает упрочнение структуры, но и то, при сравнении с результатами полученными после увеличения подкормок, упрочнение это оказывается очень слабо пропорциональным увеличению количества внесенного органического вещества.

Сравнивая результаты запахивания соломы и рай-грасса становится ясным что составной тип, содержащий больше минерализующегося азота, не всегда при разложении, дает продукты активно упрочняющие почвенную структуру.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


HÉNIN S., TURC L., 1949. Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C. R. Acad. Agric.*, **35**, 41-43.

HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **9**, 73-92.

HÉNIN S., MONNIER G., TURC L., 1959. Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, 138.

JARRIGE R., 1964. Digestibilité des constituants du ray-grass. *Ann. Zootech.*, **13**, 117-150.

MEREDITH H., 1965. The significance of the rate of organic matter decomposition on the aggregation of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 547-550.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG V., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques. *Ann. agron.*, **13**, 55-63

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse, Paris.

MONNIER G., KONAN L., 1968. Influences des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, **19**, 541-551.

POCHON J., DE BARJAC H., 1958. *Traité de microbiologie des sols. Applications agronomiques.* Dunod éd., Paris.

SIMON-SYLVESTRE G., 1960. L'enfouissement des pailles dans le so . Étude générale et répercussion sur la microflore du sol., *Ann. agron.*, **11**, 5-54, 177-219.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (2), 241-555.

# SUR LES CAUSES DE LA GERMINATION SUR PLANTE DES GRAINS IMMATURES DE MAÏS. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

W. ROUTCHENKO et J.-P. SOYER
avec la collaboration technique de R. CHIGNON

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Bordeaux, I.N.R.A.,*
*33 - Pont-de-la-Maye*

## RÉSUMÉ

L'expérimentation réalisée sur des grains immatures de maïs confirme l'existence chez certaines variétés d'une prédisposition génétique à la germination prématurée. Cette prédisposition apparaît comme étant liée à la perméabilité des téguments et à la composition biochimique de l'embryon, caractères susceptibles de modifications sous l'action de différents facteurs du milieu.

L'analyse des plantes prédisposées à la germination prématurée indique qu'elles ne sont carencées en aucun des éléments nutritifs majeurs, mais on a constaté un ralentissement de la réduction de $NO_3^-$.

Les essais réalisés font apparaître l'action protectrice des fortes doses de phosphore et d'un mélange d'oligo-éléments, alors que le Zn et le Cu apportés isolément se montrent inefficaces. Ces résultats permettent de formuler l'hypothèse suivante : la germination des grains immatures de maïs se manifeste principalement sur les variétés prédisposées à ces accidents par leur patrimoine génétique, sous l'action conjuguée de multiples facteurs du milieu, causes des troubles de la nutrition en Fe et en Mn et probablement en Mo et Co.

L'étude sera poursuivie dans le but d'obtenir une confirmation de cette hypothèse et pour préciser le rôle qu'il convient d'attribuer à chacun des facteurs.

## INTRODUCTION

Dans le sud-ouest de la France, la germination sur épi de grains immatures de maïs n'a été observée que de façon sporadique antérieurement aux années 1966-1967. Très récemment, ces accidents se sont multipliés et occasionnent tous les ans des dégâts importants.

Les résultats de l'enquête relative aux conditions qui favoriseraient l'apparition de ce phénomène laissent supposer qu'ils sont dus à l'intervention de facteurs variés : la sensibilité variétale, l'influence des conditions pédo-climatiques, l'action de l'état cultural du sol, l'effet de la nutrition minérale.

Aucune des variétés cultivées ne se montre totalement résistante, mais on observe des degrés différents de sensibilité : la plus sensible serait l'*I. N. R. A. 260*, alors que les variétés *I. N. R. A. 400*, *Iowa 4417*, *Funk's G 17 A* se montreraient plus résistantes.

Certaines années, les accidents se produisent surtout dans des sols ayant une forte teneur en argile, riches en calcaire actif, situés dans des périmètres à faible pluviométrie estivale. En d'autres années, ils sévissent principalement dans les sols sableux, acides et frais.

La germination prématurée intéresserait principalement les cultures établies sur des défriches, surtout lorsque le travail du sol a été exécuté dans de mauvaises conditions. Après plusieurs années de culture, la fréquence et la gravité des accidents diminuent et ceux-ci peuvent cesser complètement sans qu'un traitement spécifique ait été appliqué.

Les apports importants et surtout tardifs d'azote favoriseraient ce type de germination, alors qu'une fertilisation phosphatée intense (150 unités/ha au minimum), de même que l'emploi de certains produits commerciaux contenant un mélange d'oligo-éléments, exerceraient une action protectrice.

L'ensemble de ces informations établit que la germination sur épi de grains immatures de maïs correspond au type de problème posé par la production agricole, où l'intervention des facteurs agronomiques du milieu se traduit sur la plante par des manifestations de caractère nettement physiologique.

## DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

Pour formuler une hypothèse de travail sur les causes de la germination de grains immatures de maïs, il y a tout d'abord lieu de se rappeler que le grain de maïs est susceptible de germer dès le 8e jour qui suit la fécondation, à la condition de subir une courte période de dessiccation (KOUSMITCHEV et KOULECHOV, 1955).

Dans un grain parvenu à maturité, la levée de dormance s'opérerait suivant le schéma ci-dessous (BELDEROK, 1968) (tableau 1).

Dans les conditions normales, le grain ne germe pas au cours de la maturation, grâce à l'équilibre qui s'établit entre l'activité des substances de croissance et l'activité des substances inhibitrices de la germination.

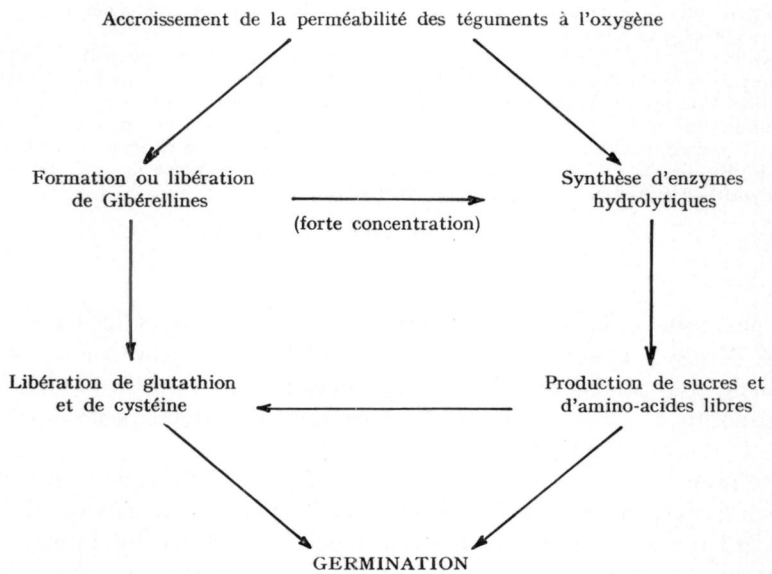
Les facteurs de l'inhibition seraient localisés : d'une part, dans les téguments ; d'autre part, dans l'embryon lui-même. Les téguments paraissent agir principalement en tant que barrière physique qui empêche les échanges avec le milieu externe. L'inhibition tégumentaire peut disparaître à la suite de lésions ou de l'action de températures alternées : tantôt basses, tantôt élevées.

Les inhibiteurs de croissance de l'embryon, de nature très variée, comprendraient, outre la pression hypertonique de la sève, des acides organiques (malique, tartrique, citrique), des hétérosides cyanogénétiques, des aldéhydes (acétique, benzoïque, salicylique), des polypeptides, des substances volatiles (ammoniaque, éthylène). L'action des substances de croissance est également contrebalancée dans l'embryon par l'hormone de la dormance : l'acide abscissique (BINET et BRUNEL, 1967).

La germination des céréales sur la plante a été étudiée principalement chez l'orge, l'avoine, le blé, le riz ; ces études ne s'appliquent pas au cas qui nous intéresse, car elles traitent de la germination en épi de grains parvenus à maturité. A notre connaissance, la seule étude qui concerne la germination de grains de maïs immatures est celle de MANGELSDORF (1929), qui porte exclusivement sur les caractères génétiques déterminant une prédisposition à la germination prématurée. Nos observations dans le sud-ouest de la France indiquent également qu'il existe une relation entre la manifestation de ce phénomène et les caractères génétiques de l'espèce, mais montrent en outre l'intervention de certains facteurs du milieu, notamment de la nutrition minérale.

TABLEAU I

*Phénomènes impliqués dans la levée de dormance de grains de céréales*
(d'après BELDEROK, 1968)




En l'absence de toute autre information, il a paru nécessaire de procéder tout d'abord à une expérience visant à établir si, dans les conditions qui nous intéressent, la sensibilité variétale était effectivement en cause et, dans l'affirmative, de rechercher comment elle pouvait être modifiée par les conditions du milieu.

## I. — EXPÉRIMENTATION PORTANT SUR DES GRAINS IMMATURES

### *Matériel et méthodes*

Nous avons utilisé des grains immatures de maïs appartenant à deux variétés : l'une sensible (*I. N. R. A. 260*), l'autre relativement résistante (*I. N. R. A. 400*).

Les grains, récoltés au stade pâteux, provenaient des dispositifs expérimentaux établis à Serres-Castet (Pyrénées-Atlantiques) et à Voulgézac (Charente), où le maïs a mûri ensuite norma-

lement, et des dispositifs de Neuillac et Le Mesnil (Charente-Maritime), où la germination prématurée s'est manifestée intensément.

Les traitements appliqués dans ces essais comprenaient des doses variées d'azote et de phosphore, ainsi que des apports de divers oligo-éléments.

Nous avons d'abord déterminé l'énergie germinative des grains des deux variétés, en les soumettant à un régime thermique susceptible de lever la dormance tégumentaire. Un lot de grains de chacune des deux variétés et de deux provenances (Neuillac et Serres-Castet) est maintenu à une température constante de + 25°C, les grains d'un second lot étant soumis alternativement à + 6°C pendant 8 heures, puis à 25°C pendant 16 heures. L'humidité est maintenue à un taux voisin de la saturation (100 p. 100). Les résultats sont appréciés par référence au nombre de germes parus après 8 et 15 jours d'incubation.

Un second essai est conçu pour mettre en évidence la relation qui pourrait exister entre la propension à la germination prématurée et la perméabilité des téguments des grains de diverses provenances. A cet effet, des grains calibrés dont la teneur en eau est voisine sont plongés dans de l'eau distillée pendant 24 heures. La perméabilité des téguments est appréciée par référence à la quantité d'eau absorbée.

Parallèlement aux tests pratiqués sur des grains entiers, nous avons procédé à des expériences sur des embryons excisés dans le but de nous assurer de l'absence d'organismes fongiques susceptibles de produire des substances de croissance (Gibérellines), et de comparer l'énergie germinative d'embryons d'origines variées à l'intensité de la germination observée au champ sur les plantes correspondantes.

Les embryons, prélevés dans des conditions stériles, sont cultivés en boîte de Petri sur un milieu composé d'une solution de Knop additionnée de gélose et d'acides malique et citrique.

L'action des apports d'oligo-éléments et des différents niveaux de N et de P sur la composition chimique du grain est appréciée en analysant les échantillons provenant du dispositif de Neuillac, où la germination s'est manifestée diversement suivant le traitement. Outre les dosages de N, P, K, Mg, Ca, Na, Fe et Mn, nous avons déterminé la composition du grain en acides organiques, suivant la technique de ROUX et LESAINT (1959).

## *Résultats*

La plus forte propension à la germination de l'*I. N. R. A. 260* par rapport à l'*I. N. R. A. 400* — et surtout l'influence de l'origine de l'échantillon, après 15 jours uniquement — apparaissent nettement au tableau 2, les grains des variétés prélevés sur le dispositif de la Charente-Maritime germant plus intensément que ceux provenant des Pyrénées-Atlantiques.

Le tableau 3 montre que, pour la variété *I. N. R. A. 260*, le maximum d'absorption d'eau correspond aux grains récoltés sur les plantes témoins du dispositif de Neuillac (Charente-Maritime) où la germination prématurée est intense, ceux de même provenance mais ayant reçu des oligo-éléments absorbant moins d'eau et se rapprochant à cet égard du comportement des échantillons de Serres-Castet (Pyrénées-Atlantiques), moins enclins à ce type de germination. La perméabilité des téguments à l'eau évolue dans le même sens que la propension à la germination.

Il ressort du tableau 4 que, pour la variété *I. N. R. A. 260*, le pourcentage d'embryons isolés développés sur milieu synthétique est d'autant plus élevé que le pourcentage d'épis germés aux champs est lui-même élevé. Cette expérience a démontré également l'absence de tout organisme fongique.

Le tableau 5 renseigne sur l'action des apports d'oligo-éléments et des différents niveaux de l'alimentation en N et P sur la composition minérale du grain (dispositif de Neuillac), en relation avec les indices relatifs à l'intensité de la germination sur épi.

On constate que les oligo-éléments ont accru la résistance des plantes à la germination prématurée et modifié la composition chimique du grain : dans la plupart des cas, la richesse en azote (excepté pour N 300-P 250 et N 300-P 50) et en phos-

TABLEAU 2

*Germination expérimentale du Maïs sur épis en fonction du régime thermique*
(Humidité relative voisine de 100 p. 100)

| | Variété | 25°C permanents | | 5°C, 25°C, alternés | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Après 8 j | Après 15 j | Après 8 j | Après 15 j |
| Serres-Castet (Pyrénées-Atlantiques) | *I. N. R. A. 260* | Pas de germination | Spathes ouv. : 11 % germés. Spathes fermées 6 % germés. | Pas de germination | Spathes ouv. : 64 % germés. Spathes fermées 17 % germés. |
| | *I. N. R. A. 400* | Pas de germination | Spathes ouv. : 1 % germés. Spathes fermées Pas de germes. | Pas de germination | Spathes ouv. : 1 % germés. Spathes fermées Pas de germes. |
| Neuillac (Charente-Maritime) | *I. N. R. A. 260* | < 30 % germés | Très forte germinat. > 50 % | > 30 % germés | Très forte germinat. > 60 % |
| | *I. N. R. A. 400* | < 30 % germés | Forte germination > 40 % | > 30 % germés | Forte germination > 40 % |

TABLEAU 3

*Poids d'eau absorbée en 24 heures en p. 100 du poids initial du grain*
(I. N. R. A. 260)

| Origine de la graine | Traitement | Eau absorbée en 24 heures | P. 100 d'épis germés au champ |
|---|---|---|---|
| Neuillac | Témoin | 33,4 | 83,4 |
| | Oligo-éléments | 29,0 | 9,5 |
| Serres-Castet | Témoin | 27,6 | 0 |

TABLEAU 4

*Pourcentage d'embryons excisés développés sur milieu synthétique comparé au pourcentage d'épis germés aux champs* (I. N. R. A. 260)

| Origine et traitements | Pourcentage d'embryons développés après 56 h d'incubation | Pourcentage d'épis germés aux champs |
|---|---|---|
| *Neuillac* | | |
| Parcelle témoin ..... | 50 | 71,4 |
| Parcelle oligo-éléments. | 30 | 7,7 |
| *Serres-Castet* | | |
| Parcelle témoin ..... | 20 | 0 |

phore (excepté N 300-P 50) se trouve augmentée, alors que les teneurs des autres éléments, sauf Mn, ont, dans l'ensemble, tendance à baisser.

Indépendamment des traitements, la richesse du grain en K et en Ca est très élevée (LOUÉ, 1962-1966). Par contre, les teneurs en Fe et Mn sont très faibles (ANDREENKO et KOUPERMANN, 1959).

TABLEAU 5

*Effet des apports d'oligo-éléments sur l'intensité de la germination et sur la composition chimique du grain*

Essai Neuillac

| Traitements | N 100-P 250 | | N 100-P 50 | | N 300-P 250 | | N 300-P 50 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Témoin | Oligo-éléments | Témoin | Oligo-éléments | Témoin | Oligo-éléments | Témoin | Oligo-éléments |
| Épis germés p. 100 | 83,4 | 9,5 | 66,7 | 14,3 | 71,4 | 7,7 | 100 | 17,7 |
| N p. 1 000 | 15,8 | 17,0 | 13,0 | 16,6 | 19,4 | 19,4 | 22,6 | 20,2 |
| P p. 1 000 | 2,20 | 2,64 | 2,00 | 3,28 | 2,56 | 3,04 | 4,04 | 4,03 |
| S p. 1 000 | 1,33 | 0,67 | 0,87 | 0,73 | 1,05 | 0,92 | 1,03 | 0,73 |
| K p. 1 000 | 4,03 | 2,81 | 3,44 | 3,38 | 3,81 | 3,59 | 4,69 | 3,03 |
| Mg p. 1 000 | 1,18 | 0,74 | 1,03 | 0,98 | 1,18 | 1,13 | 1,38 | 1,00 |
| Ca p.p.m. | 313 | 250 | 375 | 344 | 344 | 344 | 375 | 344 |
| Na p.p.m. | 26 | 16 | 23 | 11 | 8 | 17 | 20 | 9 |
| Fe p.p.m. | 20 | 20 | 18 | 20 | 26 | 13 | 28 | 6 |
| Mn p.p.m. | Traces | Traces | Traces | Traces | 4 | 8 | 6 | Traces |

Le tableau 6 indique que, pour les deux lots de grains du dispositif de Neuillac, l'un provenant des plantes témoins, l'autre de plantes traitées aux oligo-éléments, la composition en acides organiques est différente. Globalement, les acides organiques sont plus abondants dans le lot « oligo-éléments » que dans le lot « témoin ».

TABLEAU 6

*Composition du grain en acides organiques solubles en milieu hydro-alcoolique* (en méq. p. 100 de matière sèche)

Dispositif de Neuillac (*I. N. R. A. 260*)

| | Témoin | Oligo-éléments |
|---|---|---|
| Acide malique | 0,36 | 0,47 |
| Acide citrique | 0,24 | 0,13 |
| Acide succinique | 0,18 | 0,13 |
| Acide tartrique | 0,16 | 0,00 |
| Acide oxalique | 0,04 | 0,11 |
| Acide fumarique | 0,04 | 0,06 |
| Acide glycérique | 0,00 | 0,06 |
| Non identifié | 0,24 | 0,54 |
| Total | 1,26 | 1,50 |

L'interprétation de la différence de composition entre les deux lots (témoin et oligo-éléments) est difficile, car on sait que cette composition varie au cours de la maturation du grain (DUPERON, 1958). En admettant que les grains soumis à l'analyse sont sensiblement au même stade physiologique, il apparaît alors que la plus faible teneur en malate et en oxalate du lot témoin, accompagnée d'une teneur plus forte en citrate, traduirait une répartition des acides organiques du lot témoin analogue à celle qui peut résulter d'une déficience en fer (LAULHÈRE, 1969).

## II. — EXPÉRIMENTATION SUR LE TERRAIN

L'expérimentation sur la germination prématurée du maïs présente des difficultés particulières par suite de l'impossibilité de reproduire à volonté le phénomène étudié, tant que les causes exactes qui le déclenchent demeurent inconnues. Les essais doivent être conduits principalement *in situ*, puisque les caractéristiques physico-chimiques et l'état cultural des sols ainsi que les conditions climatiques sont des facteurs susceptibles d'influencer le phénomène.

TABLEAU 7

*Analyse des sols des dispositifs expérimentaux*

| | Neuillac | Le Mesnil | Voulgézac | Serres-Castet |
|---|---|---|---|---|
| Terre fine 2 mm (p. 100) | 97 | 95 | 89 | 100 |
| *P. 100 de terre fine sèche:* | | | | |
| Colloïdes minéraux | 58,3 | 62,8 | 24,3 | 25,5 |
| Limon 2-20 μ | 17,2 | 15,2 | 30,5 | 32,9 |
| Limon 20-50 μ | 10,9 | 9,3 | 16,2 | 15,8 |
| Sable 50-200 μ | 8,0 | 5,8 | 15,7 | 14,2 |
| Sable 200-2 000 μ | 5,7 | 7,0 | 13,0 | 11,6 |
| Matière organique | 3,8 | 3,5 | 2,1 | 3,1 |
| Calcaire total p. 100 | 22,7 | 16,8 | 55,6 | — |
| Calcaire actif p. 100 | 11,2 | 7,9 | 17,5 | — |
| pH (eau) | 8,04 | 8,03 | 8,21 | 5,45 |
| pH (KCl N) | 6,80 | 6,85 | 7,30 | 4,50 |
| Carbone p. 1 000 | 20,4 | 18,0 | 11,6 | 17,5 |
| Azote p. 1 000 | 2,04 | 1,97 | 1,30 | 1,53 |
| C/N | 10,0 | 9,1 | 8,9 | 11,4 |
| Capacité d'échange méq. p. 100 | 56,9 | 58,8 | 21,4 | — |
| Calcium échangeable p. 1 000 | 14,500 | 14,500 | 7,900 | 0,752 |
| Magnésium échangeable p. 1 000 | 0,122 | 0,134 | 0,072 | 0,056 |
| Potassium échangeable p. 1 000 | 0,290 | 0,515 | 0,120 | 0,230 |
| Sodium échangeable p. 1 000 | 0,040 | 0,045 | 0,035 | 0,009 |
| Acide phosphorique assim. | 0,226 | 0,156 | 0,114 | 0,131 |
| Fer total p. 100 | 1,89 | 1,84 | 0,89 | — |
| Fer libre p. 100 | 0,46 | 0,40 | 0,24 | — |
| Manganèse échang. (p.p.m.) | 0,33 | 1,81 | 0,54 | 2,21 |
| Manganèse réduct. (p.p.m.) | 207,0 | 137,0 | 65,7 | — |
| Bore (p.p.m.) | 0,5 | — | 0,3 | — |

D'autres difficultés résultent du fait que les conditions de la nutrition des plantes doivent être appréciées en cours de végétation, alors qu'on n'a pas la certitude de voir des troubles se manifester au moment de la maturation du grain.

Pour ces raisons, nous avons été amenés à multiplier les dispositifs expérimentaux et à les disperser sur le plan géographique. Quatre essais furent implantés dans des sols où la germination prématurée pouvait se manifester : à Neuillac et Le Mesnil en Charente-Maritime, à Voulgézac en Charente et à Serres-Castet, près de Pau, dans les Pyrénées-Atlantiques.

Le tableau 7 renseigne sur la constitution physique et la composition chimique des quatre sols expérimentaux et montre qu'ils n'ont apparemment aucun caractère commun.

Les objectifs de notre expérimentation étaient les suivants :

— étudier la nutrition des plantes en éléments majeurs ;

— contrôler l'action d'un complexe d'oligo-éléments (dont l'analyse est donnée dans le tableau 8), réputé comme susceptible d'exercer une action protectrice ;

— apprécier le rôle que pourraient jouer dans la manifestation de la germination prématurée les différents niveaux des apports de N et de P ;

— déterminer l'action du Cu et du Zn apportés séparément, ainsi que l'action d'un mélange de Mn et de B.

TABLEAU 8

*Composition chimique du complexe oligo-éléments employé au cours de l'expérimentation*

| Élément | P. 100 | P. 1000 | P.p.m. |
|---|---|---|---|
| *Soufre* | 1,5 | | |
| Azote | | 0,60 | |
| Calcium | | 23,30 | |
| Sodium | | 4,56 | |
| *Fer* | 7,8 | | |
| *Manganèse* | | 1,89 | |
| Phosphore | | | 160,0 |
| Cuivre | 8,7 | | |
| Magnésium | | 2,68 | |
| Potassium | 3,6 | | |
| Zinc | 3,7 | | |
| *Molybdène* | | | 6,1 |
| *Bore* | | | 15,1 |
| Silicium | 4,97 | | |
| Aluminium | 3,49 | | |
| Nickel | | | 38,5 |
| Chlore | | | 74,9 |
| *Cobalt* | | | 304,0 |

Analyse spectrométrique effectuée par le Laboratoire d'analyses physiques de Pau.

Les essais sur le terrain furent exploités au moyen d'observations et de mesures biométriques réalisées en cours de végétation. Nous avons analysé les feuilles, les tiges et les racines, ainsi que la sève extraite des tissus conducteurs. L'humidité des tiges, des rafles et du grain a été mesurée au moment de la récolte.

La germination prématurée s'est manifestée intensément sur les dispositifs de Neuillac et Le Mesnil. Par contre, aucune anomalie de maturation n'a été observée à Voulgézac et à Serres-Castet.

Nous nous contenterons de présenter, dans cette note, les résultats recueillis sur le dispositif de Neuillac ; nous les comparerons ensuite aux caractéristiques générales de la nutrition minérale des plantes sur les 3 autres essais.

*Résultats*

Les indices figurant au tableau 9 se rapportent à l'analyse de la sève extraite de la nervure de la feuille de l'épi au stade de la floraison mâle. La technique de prélèvement, les procédés analytiques et le mode d'interprétation des résultats ont été décrits précédemment (ROUTCHENKO, 1967).

Le tableau 9 permet de faire les constatations suivantes :

— la croissance des plantes a été stimulée par l'apport d'oligo-éléments et par les fortes doses d'azote (indices de croissance) ;

— l'apport d'oligo-éléments réduit considérablement le pourcentage d'épis germés ; cette action se trouve renforcée par les fortes doses de P ;

— dans les plantes témoins, où la croissance est réduite, la plupart des éléments minéraux ont tendance à s'accumuler, ce qui indique l'intervention de facteurs retardant l'utilisation par ces plantes des éléments absorbés ;

— les apports d'oligo-éléments stimulent l'intégration primaire de l'azote, ce qui ressort non seulement de l'évolution des taux de $NO_3^-$ et de $NH_4^+$ mais aussi des variations de l'indice Nm p. 100 NST (azote minéral p. 100 de l'azote soluble total); l'intensification de la réduction des nitrates dans les plantes recevant un apport d'oligo-éléments a été confirmée par des tests de l'activité de la nitrate-réductase suivant la technique proposée par BAR AKIVA et STERNBAUM (1965) ;

— aucun des éléments majeurs n'intervient, ni à un niveau de carence, ni à un niveau excessif.

Les informations recueillies au moment de la récolte sont réunies sur la figure 1.

L'examen de la courbe relative à l'évolution du pourcentage d'épis germés en fonction des traitements permet de distinguer trois niveaux d'intensité dans le phénomène étudié :

— *moins de 10 p. 100 d'épis germés ;* dans cette catégorie se rangent tous les traitements comprenant des apports du complexe d'oligo-éléments ;

— *de 50 à 65 p. 100 d'épis germés ;* ce groupe réunit tous les traitements comportant l'apport de phosphore à raison de 250 unités/ha, autres que ceux recevant le complexe d'oligo-éléments ;

— *plus de 65 p. 100 d'épis germés ;* on y trouve tous les traitements à faible dose de phosphore (50 unités/ha), sans apport d'oligo-éléments.

Un traitement s'intercale entre le premier et le second groupe : c'est le traitement P 250, N 100, Mn + B. La forte dose de phosphore, associée au Mn + B, a

TABLEAU 9

*Effet des apports du complexe oligo-éléments sur la composition de la sève aux différents niveaux de l'alimentation en N et P*

(Prélèvements du 17 juillet, stade de la floraison mâle)
Essai de Neuillac

| | N 100-P 250 | | N 100-P 50 | | N 300-P 250 | | N 300-P 50 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Témoin | Oligo-éléments | Témoin | Oligo-éléments | Témoin | Oligo-éléments | Témoin | Oligo-éléments |
| Pourcentage d'épis germés à la récolte | 83,4 | 9,5 | 66,7 | 14,3 | 71,4 | 7,7 | 100,0 | 17,7 |
| Ind. de croissance | 117 | 144 | 137 | 143 | 139 | 150 | 137 | 160 |
| N ($NO_3^-$) ..... mg/l | 24 | 4 | 32 | 12 | 264 | 100 | 380 | 148 |
| N ($NH_4^+$) | 23 | 7 | 19 | 6 | 2 | 3 | 22 | 6 |
| N aminé + amidé | 49 | 33 | 45 | 122 | 190 | 37 | 90 | 42 |
| N protéique | 26 | 20 | 40 | 44 | 48 | 52 | 68 | 68 |
| N soluble total | 122 | 64 | 136 | 184 | 504 | 192 | 560 | 264 |
| P ($H_2PO_4^-$) | 14 | 9 | 9 | 9 | 16 | 11 | 12 | 8 |
| P glucidique | 22 | 21 | 15 | 20 | 24 | 21 | 20 | 14 |
| P ppté p/alcool | 137 | 76 | 65 | 70 | 156 | 110 | 116 | 67 |
| P soluble total | 173 | 106 | 89 | 99 | 196 | 142 | 148 | 89 |
| S ($SO_4^{--}$) | 21 | 20 | 21 | 18 | 21 | 19 | 21 | 14 |
| Soufre soluble total | 54 | 33 | 40 | 40 | 42 | 32 | 42 | 35 |
| $Cl^-$ | 1 170 | 1 170 | 1 170 | 1 986 | 922 | 1 383 | 709 | 1 170 |
| $\Sigma$ des anions méq./l | 36 | 35 | 37 | 58 | 47 | 48 | 49 | 45 |
| $K^+$ ..... mg/l | 4 160 | 3 080 | 3 640 | 4 400 | 3 400 | 2 920 | 3 080 | 3 080 |
| $Ca^{++}$ | 83 | 83 | 107 | 120 | 139 | 86 | 104 | 83 |
| $Mg^{++}$ | 146 | 109 | 138 | 151 | 164 | 115 | 165 | 135 |
| $Na^+$ | 52 | 68 | 60 | 40 | 52 | 40 | 48 | 52 |
| $\Sigma$ des cations méq./l | 126 | 95 | 114 | 133 | 110 | 90 | 101 | 97 |
| $\Sigma$ cations/$\Sigma$ anions | 3,46 | 2,73 | 3,08 | 2,28 | 2,35 | 1,89 | 2,07 | 2,16 |
| K p. 100 $\Sigma$ cations | 84,15 | 82,64 | 81,86 | 84,56 | 79,22 | 82,64 | 77,86 | 81,46 |
| Ca p. 100 $\Sigma$ cations | 3,27 | 4,34 | 4,68 | 4,49 | 6,31 | 4,74 | 5,12 | 4,28 |
| Mg p. 100 $\Sigma$ cations | 9,49 | 9,39 | 9,97 | 9,32 | 12,28 | 10,45 | 13,40 | 11,47 |
| Na p. 100 $\Sigma$ cations | 1,78 | 3,09 | 2,28 | 1,29 | 2,05 | 1,91 | 2,05 | 2,33 |
| $NH_4$ p. 100 $\Sigma$ cations | 1,29 | 0,51 | 1,18 | 0,31 | 0,12 | 0,23 | 1,55 | 0,43 |
| N.m. p. 100 NST | 38,52 | 17,18 | 37,50 | 9,78 | 52,77 | 53,64 | 71,78 | 58,33 |
| P.m. p. 100 PST | 8,09 | 8,49 | 10,11 | 9,09 | 8,16 | 7,74 | 8,10 | 8,98 |
| S.m. p. 100 SST | 38,88 | 60,60 | 52,50 | 45,00 | 50,00 | 59,37 | 50,00 | 40,00 |
| NST/PST | 0,70 | 0,60 | 1,52 | 1,85 | 2,57 | 1,35 | 3,78 | 2,96 |
| NST/SST | 3,20 | 3,27 | 2,22 | 2,47 | 4,66 | 0,59 | 3,52 | 1,54 |

réduit la germination de manière appréciable mais moins efficacement que les apports du complexe d'oligo-éléments.

Si l'on fait abstraction des différents niveaux de N et de P, et si on établit les moyennes pour les traitements : oligo-éléments, Zn, Cu et Mn + B, on obtient les indices de comparaison suivants, le pourcentage d'épis germés des témoins étant affecté de l'indice 100 :

| | |
|---|---|
| Zn ..... | 111,7 |
| Cu ..... | 113,6 |
| Mn + B ..... | 93,6 |
| Oligo-éléments ..... | 10,1 |

Nous constatons alors que le Zn et le Cu ont eu un effet plutôt aggravant, alors que l'apport de Mn + B a légèrement réduit l'intensité du phénomène. Le traitement oligo-éléments a, par contre, nettement diminué le pourcentage d'épis germés.

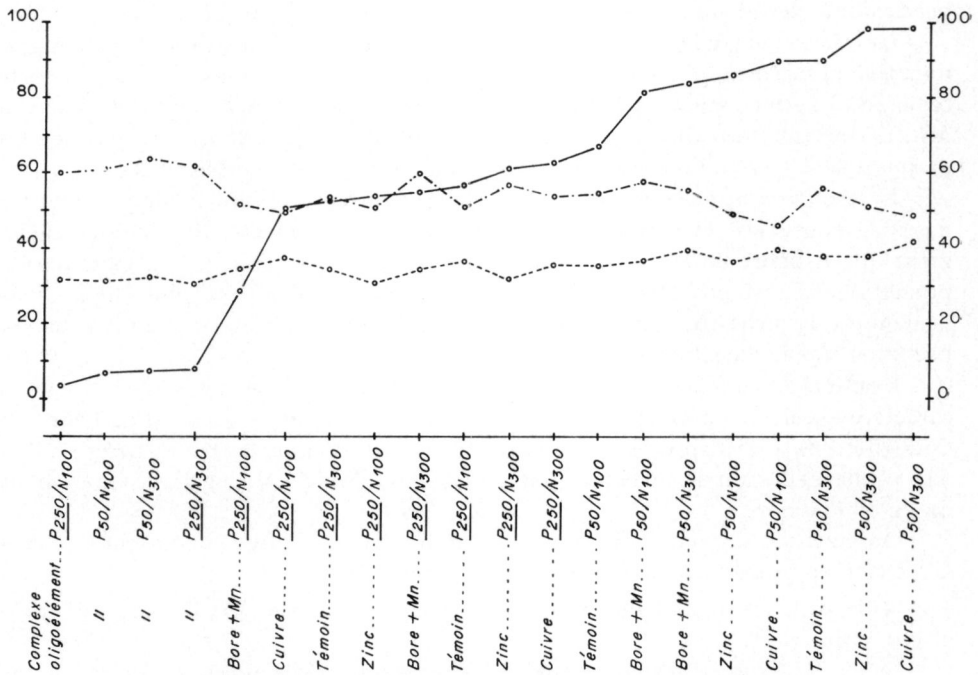



FIG. 1. — *Variations du rendement, de l'humidité du grain et du pourcentage d'épis germés en fonction des traitements*
Essai de NEUILLAC

——— P. 100 d'épis présentant des grains germés
------- Rendements q/ha (15 p. 100 d'humidité)
--------- P. 100 d'humidité du grain à la récolte

Les trois paramètres représentés sur le graphique, humidité du grain, rendement et intensité de la germination, ne se trouvent pas liés les uns aux autres d'une manière systématique.

Les niveaux de l'alimentation en différents éléments, sur les dispositifs de Neuillac et Le Mesnil où la germination a été intense, présentent une grande analogie ;

on retrouve toutefois des niveaux similaires sur l'un ou l'autre des essais où la germination prématurée ne s'est pas manifestée, ce qui prive ces caractéristiques de toute signification vis-à-vis du phénomène étudié.

## DISCUSSION

Les résultats de la présente étude indiquent que la germination sur épis de grains immatures de maïs peut avoir des causes multiples.

Les expériences réalisées sur les grains et les embryons excisés confirment le rôle fondamental du patrimoine génétique de la variété, mais attestent également que la sensibilité variétale peut être modifiée par les conditions du milieu. Les différences dans ces conditions se traduisent notamment par des modifications de la perméabilité des téguments et de la composition biochimique de l'embryon.

La relation entre la composition minérale du grain et sa prédisposition à la germination prématurée n'apparaît pas clairement, bien que les grains qui ont une forte tendance à germer soient particulièrement riches en K et *pauvres en Fe et surtout en Mn*. Les niveaux des autres éléments sont voisins de la normale. La composition du grain en acides organiques renforce la probabilité d'une déficience en fer.

L'expérimentation conduite sur le terrain confirme l'action bénéfique des fortes doses de phosphore, et surtout d'un complexe d'oligo-éléments. Elle indique également que l'apport de Mn + B renforce la résistance des plantes à la germination prématurée. Il est probable que l'action de ces éléments eût été plus efficace s'ils avaient été apportés sous une forme ou au moyen d'une technique évitant leur immobilisation rapide dans les sols alcalins.

L'action du complexe d'oligo-éléments est très importante mais elle n'a pas un caractère absolu. Compte tenu de sa composition chimique — et aussi de l'absence d'un effet positif des apports de Cu et de Zn — son action doit être rattachée à l'un ou à plusieurs des autres éléments qu'il renferme : Fe, Mn, Co, Mo, agissant séparément ou en interaction.

On constate que des voies d'investigation indépendantes conduisent à considérer comme probable l'existence d'une relation entre :

— les conditions de l'alimentation des plantes en Fe et Mn, et peut-être en Co et Mo, d'une part,

— et la germination prématurée des variétés prédisposées à ces accidents, d'autre part.

On peut invoquer un grand nombre d'autres faits qui militent en faveur de cette hypothèse :

— la nutrition des plantes en Fe, Mn et Co est placée sous l'étroite dépendance d'un grand nombre de facteurs du milieu, tels que : pH, état d'oxydo-réduction du sol, richesse du sol en matière organique, régime hydrique. L'intervention de ces facteurs permettrait d'expliquer la relation observée entre la germination prématurée et l'état cultural du sol, de même que la gravité des accidents qui se produisent en particulier l'année qui suit la défriche, puis leur disparition après quelques années de culture sans application d'aucun traitement spécifique.

— Il existe des différences de comportement variétal vis-à-vis de la nutrition du Maïs en Fe, Mn et Co; en particulier, certaines variétés s'avèrent ferro-inactives (BROWN et BELL, 1969).

— Le fer et le manganèse, comme le molybdène, interviennent dans la réduction des nitrates par la plante (PILET, 1961). Or, nous avons constaté que les apports d'oligo-éléments activent cette réduction et augmentent simultanément la résistance des plantes à la germination prématurée.

— Le rôle primordial du Fe et du Mn dans les phénomènes d'oxydo-réduction et dans l'activité enzymatique et auxinique des végétaux est bien connu. On sait en particulier que c'est au Mn que l'on doit la destruction par voie oxydasique de certaines substances de croissance (AIA), abondantes dans le jeune grain de maïs mais qui disparaissent ensuite au cours de la maturation.

L'action protectrice des engrais phosphatés pourrait également s'expliquer, soit par une acidification du milieu qui favoriserait l'absorption du Fe et du Mn, soit par l'apport direct de ces éléments par l'engrais.

## CONCLUSIONS

La germination sur épi des grains immatures de Maïs serait en relation avec des troubles de la nutrition de la plante en oligo-éléments: Fe, Mn, et probablement Co et Mo, troubles qui apparaissent liés aux différentes conditions du milieu qui modifient l'assimilabilité de ces éléments.

Le phénomène de la germination sur épi se manifeste avec une gravité d'autant plus forte que la sensibilité de la variété de Maïs cultivée est elle-même élevée vis-à-vis de ces troubles.

*Reçu pour publication en janvier 1971.*

## SUMMARY

### ON THE CAUSES OF PREMATURE GERMINATION IN IMMATURE GRAINS OF MAIZE
### PRELIMINARY RESULTS

Experiments carried out with immature grains of maize confirm the existence of certain varieties having a genetic predisposition to premature germination. This predisposition appears to be linked to the permeability of the teguments and the biochemical composition of the embryo, both of which may be modified through the action of different factors in the environment.

Analysis of plants predisposed to premature germination failed to indicate any deficiency in major nutritive elements, but revealed a slackening in the reduction of $NO_3^-$.

The tests carried out establish the protective action of strong doses of phosphorus and a mixture of micro-elements, whereas Zn and Cu brought in singly are shown to be ineffective. These results lead to the hypothesis that the germination of immature grains of maize occurs mainly in varieties thus predisposed by genetic factors, under the combined action of environmental factors causing disturbances in nutrition in Fe and Mn and probably Mo and Co.

Experiments will be continued to attempt to confirm this hypothesis and to determine the relative importance of each of these factors.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ÜBER DIE URSACHEN DER AUF DER PFLANZE EINTRETENDEN KEIMUNG VON UNREIFEN MAISSAMEN PRÄLIMINÄRE ERGEBNISSE

Die bei unreifen Maissamen durchgeführte Untersuchung bestätigt bei verschiedenen Sorten eine genetische Prädisposition für eine frühzeitige Keimung. Diese Prädisposition scheint an die Wasserdurchlässigkeit der Samenhäutchen und an die biochemische Zusammensetzung des Embryos gebunden zu sein, also an Eigenschaften, die unter der Wirkung verschiedener Standortfaktoren abänderungsfähig sind.

Die Analyse der Pflanzen, die für die frühzeitige Keimung empfänglich sind, zeigen, dass sie keinen Mangel an den hauptsächlichsten Nährstoffen aufweisen ; ein Nachlassen der $NO_3$-Reduktion wurde jedoch bei ihnen festgestellt.

Die durchgeführten Versuche zeigen die schützende Wirkung der starken Phosphordosen und eines Gemisches von Spurenelementen, während sich die gesondert zugesetzten ZN- und Cu-Mengen als unwirksam erweisen. Diese Ergebnisse erlauben die folgende Hypothese aufzustellen : die Keimung der unreifen Maissamen tritt besonders bei den durch ihre genetischen Eigenschaften zu diesen zufälligen Erscheinungen prädisponierten Sorten auf, bei der gleichzeitigen Wirkung von zahlreichen Milieufaktoren, die Ursachen von Störungen für die Pflanzenernährung mit Fe und Mn und wahrscheinlich mit Mo und Co.

Die Untersuchung wird fortgesetzt um eine Bestätigung dieser Hypothese zu erhalten und um die Rolle, die jedem der beteiligten Faktoren zukommt, zu präzisieren.

## РЕЗЮМЕ

*О причинах прорастания недозревших зерен кукурузы на растении.* Предварительные результаты.

В. РУТЧЕНКО, Ж. П. СУАЙЭ.

Эксперименты реализованные с недозревшими кукурузными зернами подтверждают существование генетического предрасположения к их преждевременному прорастанию у некоторых сортов. Это предрасположение как-будто связано с проницаемостью оболочек и с биохимическим составом зародыша, характерности легко изменяющиеся под влиянием различных факторов среды.

Анализ растений предрасположенных к преждевременному прорастанию зерен показал что у них не существует недостатка ни в одном из главных питательных элементов, но наблюдается замедление восстановления $NO^-_3$.

Результаты опытов выявляют защитное действие крупных доз фосфора и смеси микро-элементов, в то время как цинк и медь не оказывают почти никакого действия. Это позволяет предложить следующую гипотезу : прорастание недозревших зерен кукурузы на растении может произойти главным образом у сортов генетическая наследственность которых предрасполагает их к такого рода случайностям, под совместным влиянием определенных факторов среды, вызывающих у этих растений нарушение в железистом, марганцевом и, по всей вероятности и молибденовом питании.

Изучение продолжается чтобы получить подтверждение этой гипотезы и для уточнения роли каждого из факторов в этом явлении.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDREENKO S. S., KOUPERMANN F. M., 1959. *Physiologie du Maïs*. Édit. Univ., Moscou, U. R. S. S.

BAR AKIVA A., STERNBAUM J., 1965. Possible use of the nitrate reductase activity as a measure for nitrogen requirement of citrus trees. *Plant Cell. Physiol.*, **6**, 575-577.

BELDEROK B., 1968. Seed dormancy problem in cereals. *Field crops Abstr.*, **21**, 203-211.

BINET P., BRUNEL J.-P., 1967. *Physiologie végétale*, t. III.

BROWN J. C., BELL W. D., 1969. Iron uptake dependent upon genotype of Corn. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **33**, 1, 09-101.

DUPÉRON R., 1958. Évolution des acides organiques hydrosolubles non volatils au cours de la croissance et de la maturation de semences. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 342-344.

KOUSMITCHEV V. R., KOULECHOV N. N., 1955. Emploi, comme semences, de grains immatures de Maïs. *Physiologie du Maïs*, 80-82 (en russe).

LAULHÈRE J.-P., ALQUIER-BOUFFARD A., 1969. La disponibilité du fer et la chlorose. *Physiol. vég.*, **7**, 277-296.

LOUÉ A., 1962-1966. *C. R. des essais de fertilisation de la S. C. P. A.*

MANGELSDORF P. C., 1929. The inheritance of dormancy and premature germination of Maize. *Genetics*, **15**, 462-494.

PILET P.E., 1961. *Les phytohormones de croissance*, 513-514.

ROUTCHENKO W., 1967. Appréciation des conditions de la nutrition minérale des plantes, basée sur l'analyse des sucs extraits des tissus conducteurs. *Ann. agron.*, **18**, 361-402.

ROUX L., M^me^ LESAINT C., 1959. Mise au point d'une technique de détermination des acides organiques chez les végétaux. *Ann. Physiol. vég.*, **1**, 83-92.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (2), 257-259.

# CHRONIQUE DES LIVRES

DUCHAUFOUR (P.). — PRÉCIS DE PÉDOLOGIE. — 3e édition entièrement refondue, Paris, Masson, 1970, 482 p.

Cette troisième édition du *Précis de Pédologie* a fait l'objet, non d'une simple « mise à jour », mais d'une refonte totale de l'édition précédente : cette nouvelle présentation était rendue nécessaire par deux circonstances particulières qui ont, ces dernières années, révolutionné la pédologie française :

1° d'abord les progrès considérables qui ont été obtenus en cette matière, à la suite du développement de la recherche ;

2° ensuite, la mise au point, par le C. P. C. S., d'une nouvelle classification des sols, beaucoup plus complète et détaillée que la précédente, prélude à la mise en route de la cartographie de l'ensemble des sols de France.

L'auteur était cependant désireux de conserver le cadre et le volume de l'ancien Précis, ce qui posait évidemment un problème, à première vue insoluble, étant donné l'augmentation du volume des matières à traiter : ceci a été cependant rendu possible par la publication récente (1968) d'un autre ouvrage (du même auteur, à la même librairie), *L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils* ; cet ouvrage présente, par une confrontation aussi exhaustive que possible, des données de la bibliographie internationale, l'étude des processus fondamentaux de la formation des principaux groupes de sol ; dans ces conditions, la dynamique des profils a pu être présentée dans le présent *Précis*, sous une forme plus condensée, ce qui a permis, grâce à l'économie de place réalisée, de nouveaux développements concernant les problèmes de classification, l'étude physico-chimique des profils et, enfin, les applications agronomiques ou forestières. Par exemple, dans la première partie, les chapitres concernant les argiles, les complexes organo-minéraux, le potentiel d'oxydo-réduction, la dynamique du fer et de l'aluminium, ont été présentés sous une forme nouvelle. La seconde partie, qui a trait à l'étude des profils, a été presque entièrement refaite, notamment en ce qui concerne les données générales (processus d'altération et migrations) et certains groupes de sols antérieurement mal connus : rankers, andosols, certains sols hydromorphes, pélosols, sols fersiallitiques, etc ; signalons en particulier les 65 nouveaux « schémas analytiques » des profils les plus typiques, qui grâce à une légende commune, facilitent d'un seul coup d'œil l'interprétation des explications du texte.

La troisième partie, qui a trait à la pédologie pratique, a fait également l'objet d'une nouvelle mise au point : comment le praticien va-t-il utiliser les données morphologiques (études de terrain), ou analytiques (études de laboratoire) pour des problèmes aussi variés que la recherche, la reconstitution de sols dégradés, la cartographie des sols aux différentes échelles et pour différents objectifs ? C'est à ces questions essentielles que l'auteur s'est efforcé de répondre.

Cette troisième édition constituera un précieux instrument de travail, à la fois complet et très condensé pour tous ceux qui sont appelés à s'intéresser à la science du sol et particulièrement à l'étude des profils.

PRÉVOT (A. R). — HUMUS, BIOGENÈSE, BIOCHIMIE, BIOLOGIE. — Éditions de la Tourelle, 94 - Saint-Mandé, 1970, 342 p.

Malgré des recherches dont l'origine est plus que centenaire, l'étude de la matière organique dse sols reste encore d'actualité, étant donné la complexité du sujet et son importance. C'est pourquoi, tous les ouvrages qui traitent d'agronomie ou de pédologie lui consacrent un ou plu-

sieurs chapitres. Néanmoins, les traités spécialisés sur ce sujet sont relativement peu nombreux, les deux principaux étant le traité de A. WAKSMAN et celui, plus récent de KONONOVA. Toutefois, les auteurs, s'ils décrivent bien les méthodes analytiques, l'allure des transformations ou leur bilan, ne traitent pas complètement l'étude des processus fondamentaux de l'humification, c'est-à-dire de la transformation des résidus organiques divers en l'une des substances figurant parmi les constituants de l'humus.

L'ouvrage du docteur A. R. PRÉVOT vient combler cette lacune et seule la très vaste culture de microbiologiste et de biochimiste de ce Maître pouvait lui permettre de mener à bien une pareille synthèse en trois cent quarante pages d'un texte évidemment très dense.

Dans une première partie, l'auteur traite des constituants humigènes et de leurs agents lytiques. Chacun des grands groupes de composés présents chez les êtres vivants est étudié séparément. Après un bref rappel de leur composition, des situations où ils peuvent se rencontrer, l'auteur énumère pour chacun, les agents susceptibles d'assurer leur dégradation. Les espèces microbiennes sont décrites avec leurs principales caractéristiques, leurs conditions de développement si bien que l'ouvrage prend alors l'aspect d'un manuel de microbiologie appliquée. Bien qu'il s'agisse, la plupart du temps, de processus de décomposition, l'auteur traite, en passant, de la fixation de l'azote, tant par voie symbiotique que non symbiotique, de même qu'il évoque à l'occasion le devenir des composés sulfurés ou phosphorés.

Dans une deuxième partie, se trouvent rassemblés les grands cycles de l'humification après un bref rappel des problèmes posés par l'humus, tant en pédologie qu'en agronomie. Cette démarche permet au lecteur de situer les processus humogènes dans leurs cadres phénoménologiques naturels.

La lecture de l'ouvrage et sa compréhension sont facilitées par la présence de nombreuses formules structurales et de diagrammes illustrant les principales voies de l'humogenèse. Ainsi, même les non spécialistes peuvent bénéficier de l'information rassemblée dans ce remarquable ouvrage, qui contribuera certainement à faire progresser nos connaissances sur un sujet fondamental, tant pour les écologistes que pour les agronomes.

S. HÉNIN

LE MONDE RURAL GARDIEN DE LA NATURE. — Colloque international, Paris, 4 au 6 mars 1970, Cahier du C. E. N. E. C. A., numéro spécial, 2 vol., 1970, 422 p. et 501 p.

Ce colloque a été organisé par le C. E. N. E. C. A. sous l'égide du conseil de l'Europe et sous le patronage de la F. A. O. et de l'O. C. D. E.

Ces deux volumes constituent les comptes rendus des six séances du congrès, chaque séance ayant fait l'objet d'un rapport général sur un thème particulier suivi de rapports, communications et discussions correspondantes.

— *1re séance :*
Le milieu naturel, de plus en plus compromis, de plus en plus précieux.

— *2e séance :*
Le milieu rural face à l'urbanisation et à l'industrialisation ; exemple des coupures vertes.

— *3e séance :*
Prise en considération des équilibres biologiques dans les aménagements ruraux et les pratiques agricoles. Au cours de cette séance, des études sur les zones de bocage et les zones humides (marais, la Camargue) ont été présentées. Le problème de l'emploi des produits chimiques (engrais, pesticides) et des risques de pollution qui en découlent ont fait l'objet de plusieurs communications.

— *4e séance :*
Sauvegarde et mise en valeur des terres agricoles abandonnées ou en vue d'abandon. Étude de quelques solutions possibles : élevage extensif, boisements à des fins diverses, parcs et réserves, loisirs et sports de nature.

— *5e séance :*
Promotion et développement du tourisme et des séjours à la campagne.

— *6e séance :*
Pour une meilleure prise de conscience.

La liste de tous les noms des participants avec leurs fonctions et adresse se trouve à la fin du tome 2.

M. F.

RICE FERTILIZATION. — Joint FAO/IAEA division of atomic energy in food and agriculture. Vienna, IAEA, 1970, 177 p. (Technical reports, series nº 108).

Ce rapport décrit et discute les résultats obtenus, de 1962 à 1968, lors d'un programme de recherches élaboré conjointement par l'organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture et l'Agence internationale pour l'Énergie atomique, dans le but d'optimiser les fertilisations azotées et phosphatées.

Les recherches ont porté sur l'absorption par le riz des engrais azotés et phosphatés. Les études ont été menées au moyen d'isotopes radioactifs et les expériences se sont déroulées au champ, en serre et au laboratoire.

J. L.

VADE-MECUM POUR LE RELEVÉ MÉTHODIQUE DE LA VÉGÉTATION ET DU MILIEU. — Extrait du « Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu ». Paris, Ed. C. N. R. S., 1970, 169 p. Centre d'études phytosociologiques et écologiques, Montpellier.

L'étude écologique de la végétation présente un double intérêt : d'une part, elle constitue le cadre, et souvent le point de départ, d'un grand nombre de recherches biologiques fondamentales ; d'autre part, elle est aussi l'une des bases essentielles de la connaissance des ressources naturelles, pour la mise en valeur du territoire.

Pour que les études écologiques puissent s'articuler en un ensemble cohérent, il est nécessaire que tous les observateurs utilisent des méthodes aussi objectives que possible, et un langage défini, avant de comparer leurs résultats pour en tirer une synthèse. La normalisation des observations et leur interprétation statistique, imposent l'usage d'un Code uniforme et sans équivoque.

Cette codification et les principes qui l'ont guidée ont fait l'objet d'une récente publication du C. N. R. S. : « Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu » mais il s'agissait là d'un ouvrage de référence relativement encombrant. Il était donc nécessaire que les chercheurs, désireux d'utiliser sur le terrain la méthode mise au point par l'école du Professeur EMBERGER, puissent disposer d'un guide simple, d'encombrement réduit, mais rassemblant néanmoins les éléments nécessaires pour utiliser au mieux les formulaires précodés. Le présent ouvrage, rédigé par les mêmes auteurs et dans le même esprit, présente les sujets dans le même ordre :

— Identification du relevé et caractères régionaux.
— Végétation de la station.
— Caractères externes du substrat de la végétation.
— Caractères internes du sol.

An. de l'éditeur.

REICHLE (D. E.). — ANALYSIS OF TEMPERATE FOREST ECOSYSTEMS. — Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1970, 304 p.

Ce livre est le premier d'une série intitulée *Ecological studies* qui se propose d'analyser les écosystèmes naturels et leur évolution actuelle accélérée par l'augmentation de la population humaine et les progrès de la civilisation technique.

Cet ouvrage, écrit par différents auteurs, est le compte rendu d'un séminaire tenu à Gatlinburg (U. S. A.) en 1968 dans le cadre du programme biologique international (I. B. P.) sur l'écosystème de la forêt tempérée à feuilles caduques.

Les textes sont répartis en six sections :

— Analyse d'un écosystème : étude de l'effet des facteurs de l'environnement sur l'écosystème ; phénologie et productivité.
— Production primaire : étude de la biomasse, des échanges gazeux.
— Les animaux dans la production secondaire : les insectes phytophages, les oiseaux, les mammifères.
— La décomposition et le rôle des microorganismes et des invertébrés.
— Le cycle des éléments nutritifs et les relations sol-plante.
— Le cycle hydrologique avec une étude sur les précipitations et l'évapo-transpiration et l'utilisation d'un modèle pour l'étude du cycle hydrologique.

De nombreuses références par chapitre, un index sujet et un index géographique des écosystèmes forêt dans le monde complètent cet ouvrage.

M. F.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

*Le Directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 7-1971

*Dépôt légal:* 3e *trimestre 1971. N° d'impression:* 670.

# annales agronomiques

Bimestriel

1971

Vol. 22. N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1971, **22** (3), 267-290.

# INFLUENCE DE LA CONSTITUTION PHYSIQUE DES SOLS SUR LEUR COMPORTEMENT MÉCANIQUE ; SIGNIFICATION DES LIMITES D'ATTERBERG EN MATIÈRE DE TRAVAIL DU SOL

J.-C. RÉMY

avec la collaboration technique de J.-P. SEBBE

*Station agronomique, I. N. R. A.,*
*rue Fernand-Christ, 02 - Laon*

## RÉSUMÉ

Le comportement mécanique d'un sol en fonction de l'humidité peut se caractériser sommairement et globalement par ses limites d'Atterberg. Leur variation en fonction de la texture a été étudiée sur un grand nombre d'échantillons d'origine variée, en établissant les équations de régression multiple par type de matériaux.

Il apparaît que l'influence d'une classe granulométrique est d'autant plus importante qu'elle est faiblement représentée. Ceci peut se traduire par une équation du type :

$$IP = 50 \log \frac{A\ \%}{10} - 10 \log \frac{MO\ \%}{1{,}5}$$

L'influence de l'argile est évidemment prépondérante. Les limons et les sables ont une action plus faible généralement opposée. La matière organique intervient en général comme un élément compensateur en remplaçant l'argile lorsqu'elle fait défaut avec une action spécifique 7 à 8 fois plus forte et en modérant le caractère plastique des matériaux trop lourds.

L'utilisation des limites d'Atterberg peut se faire :

— en matière de stabilité de structure : la détermination de l'entretien organique minimum est rendue possible,

— en matière de travail du sol : on peut dépasser une simple classification des sols selon leur souplesse d'utilisation, et aller jusqu'à la prévision de l'action d'un outil dans des conditions données.

## INTRODUCTION

Le sol, milieu poreux partiellement rempli par l'eau, possède une grande diversité de réaction quant à la relation contrainte-déformation. Les agronomes et les ingénieurs du génie civil se sont préoccupés, chacun pour leurs besoins, du déterminisme et de la prévision du comportement mécanique du sol. Dans chaque discipline, règnent les mêmes lois, mais les domaines d'applications sont presque toujours différents. C'est ainsi, par exemple, que les uns recherchent les conditions optimales à la compaction tandis que les autres les fuient.

*Caractérisation du comportement mécanique du sol*

Les théories classiques de la résistance des matériaux tendent à prévoir le comportement des milieux poreux. Elles envisagent les phénomènes de déformations réversibles (élasticité), de déformations irréversibles (déformation plastique, rupture). Les équations mises en cause tiennent compte de grandeurs telles que le module d'élasticité de Young, l'angle de frottement interne, la cohésion dont la connaissance ou la mesure est indispensable à la quantification des problèmes. La mesure est en général délicate, longue et coûteuse. Aussi est-il quelquefois préférable d'avoir recours à des propriétés simples en relation avec ces paramètres, mais facilement mesurables à une erreur systématique près ; les variations seules sont alors très intéressantes à considérer. C'est pourquoi les limites d'Atterberg, faciles à réaliser, sont d'un très grand intérêt pour caractériser la cohésion des matériaux.

Des relations empiriques très satisfaisantes ont été trouvées quant à la variation de la cohésion en fonction de l'humidité.

Certaines sont en relation directe avec l'humidité seule. Les comparaisons entre matériaux seront dès lors difficiles. Divers types de déformation ont été utilisés pour mettre en évidence ce phénomène : traction (WILLIAM, 1959), compression simple (RICHARD, 1953 ; GÉRARD, 1965 ; RÉMY, 1966), compression triaxiale et torsion (KYVELLOS, 1956), pénétration en place (DEMOLON et HÉNIN, 1936) ou en laboratoire (MAERTENS, 1964). Les relations trouvées sont en général de type exponentiel : $y = aH^{-b}$. Des points singuliers ont été signalés par certains auteurs notamment pour des fortes humidités où la courbe présenterait un point de rebroussement (CANARACHE, 1965) et pour des faibles humidités où ces propriétés présentent un palier ou même un maximum (MAERTENS, 1964). Ces phénomènes sont interprétés comme des changements dans la nature des sites occupés par l'eau interstitielle. Dans un cas, il y aurait lubrification par excès d'eau, alors que dans l'autre, la rupture des films d'eau ferait décroître la cohésion.

Dans le même ordre d'idée, des relations plus générales peuvent caractériser la variation de la cohésion, en fonction de l'humidité d'une part et de la nature du sol d'autre part. Le dernier point s'introduit par le biais des limites d'Atterberg. Ainsi BJERRUM (1951) conclut à une relation empirique du type :

$$C^a = 7\left(\frac{LL\text{-}H}{LL\text{-}10}\right)^5$$

$C^a$ : cohésion drainée en kg/cm$^{-2}$ (1)
LL : limite de liquidité
H : humidité du sol

Nous verrons toutefois qu'il convient d'utiliser ces relations avec précaution, c'est-à-dire dans le domaine où elles ont été établies. Toutefois, le travail du sol s'effectuant dans une gamme relativement restreinte d'humidités, les comparaisons sont permises.

*Signification physique des limites d'Atterberg*

Les limites d'Atterberg sont considérées comme étant des teneurs en eau caractéristiques de changements d'état arbitrairement choisis :

Domaine solide ↑ Domaine plastique ↑ Domaine liquide
Limite de plasticité Limite de liquidité

(1) On entend par cohésion drainée, celle mesurée lorsque l'eau peut s'écouler librement. Elle correspond à une déformation lente où l'eau n'exerce aucune pression interstitielle.

La limite de liquidité correspond en théorie à la teneur en eau pour laquelle le sol possède une cohésion identique au liquide interstitiel. Pour des raisons de commodité, on choisit une cohésion très faible mais non nulle.

La limite de plasticité est atteinte par perte d'eau au moment où l'eau interstitielle ne joue plus son rôle de lubrifiant et où des contraintes par cisaillement induisent des faces de rupture. Les grains ne peuvent plus glisser de façon continue les uns par rapport aux autres, car ils sont trop rapprochés.

Un fait intéressant mérite d'être signalé au sujet de la porosité existant dans ces états caractéristiques. CAQUOT et KÉRISEL (1956) donnent les exemples suivants :

TABLEAU I

| | Limite de plasticité | | Limite de liquidité | |
|---|---|---|---|---|
| | Teneur en eau | Porosité | Teneur en eau | Porosité |
| N° 1 ..... | 25 | 0,40 | 35 | 0,48 |
| N° 2 ..... | 27 | 0,42 | 47 | 0,56 |
| N° 3 ..... | 30 | 0,45 | 70 | 0,65 |
| N° 4 ..... | 35 | 0,48 | 95 | 0,72 |

Si nous portons ces résultats sur un abaque triangulaire des trois phases sol-eau-air, nous nous apercevons (fig. 1) qu'à la limite de liquidité comme à la limite de plasticité, la totalité des pores serait remplie par l'eau.

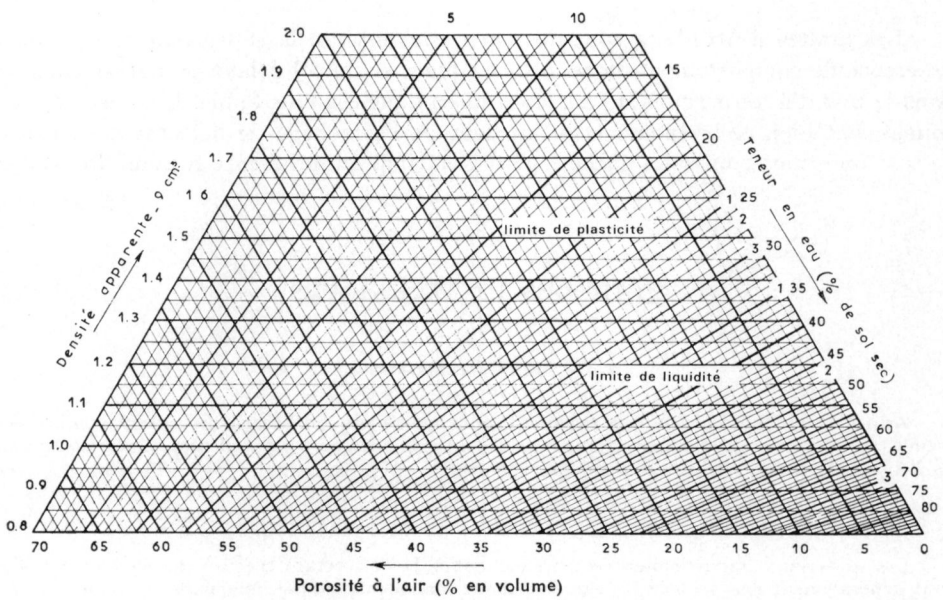



FIG. 1. — *Abaque triangulaire. Densité apparente sèche, teneur en eau, porosité à l'air (les densités apparentes sont exprimées en g/cm³)*

Nous avons vérifié, aux erreurs expérimentales près, cette propriété sur des sols argileux par des mesures au pycnomètre :

| | Densité absolue | Limite de liquidité | | | Limite de plasticité | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Humidité | Densité sèche | Eau à saturat. | Humidité | Densité sèche | Eau à saturat. |
| Sol 1 ..... | 2,41 ± 0,01 | 88,7 | 0,78 ± 0,01 | 86,8 ± 1,9 | 36,3 | 1,30 ± 0,01 | 35,5 ± 0,8 |
| Sol 2 ..... | 2,58 ± 0,01 | 58,8 | 1,03 ± 0,01 | 58,3 ± 1,1 | 22,7 | 1,61 ± 0,01 | 23,4 ± 0,6 |

En conséquence, lorsqu'au cours de la manipulation nous faisons passer le sol de la limite de liquidité à la limite de plasticité, nous ne faisons que rapprocher les grains en chassant l'eau. Il est dès lors difficile de penser que les forces capillaires soient seules responsables de l'augmentation de la cohésion.

Sur le plan mécanique, il y a un changement considérable de la résistance à la déformation. Si l'on adopte l'équation de Coulomb comme modèle, les seules variations de la cohésion (C) ne suffisent pas à expliquer le changement de comportement. Il faut y adjoindre une modification de l'angle de frottement ($\varphi$) qui augmente au fur et à mesure que les surfaces en contact s'accroissent au cours de la dessiccation.

$$F = C + P \operatorname{tg}\varphi$$

F : contrainte de rupture ou cisaillement
P : contrainte latérale
C : cohésion
$\varphi$ : angle de frottement interne

Les limites d'Atterberg sont des états conventionnels et il existe une grande différence de comportement entre le sol en place et un sol délayé et malaxé comme dans le test d'Atterberg où la résistance mécanique est plus faible. Les agriculteurs connaissent bien ce phénomène au moment de l'arrachage de betteraves en mauvaises conditions : un sol « gâché » perd beaucoup en adhérence à humidité égale.

## MÉTHODES ET TECHNIQUES

### a. — *Matériel expérimental*

Afin de réaliser un tirage non exhaustif, nous avons pris au hasard un certain nombre de profils, en quantité sensiblement proportionnelle à l'extension géographique dans le département de l'Aisne, de chacun des grands groupes suivants :

*Limons non dégradés.*

Ces matériaux appartiennent essentiellement à la couverture récente du Soissonnais. Ils sont généralement peu sableux, quelquefois assez fortement lorsque influencés par les substrats tertiaires. Ils sont toujours décarbonatés et développés en sols bruns lessivés caractérisés par la présence d'un horizon B d'accumulation d'argile bien structuré.

Le drainage interne est variable, favorable à imparfait.

Séries dominantes : LL-1*l* / LL-2*l* / LL-3*l* (1),
LE-1*l*.

Séries associées : LL-4*l* / LE-2*l*.

*Limons dégradés.*

Ces limons sont généralement plus anciens et appartiennent à la base de lœss récent, quelquefois sableux. Ils sont développés en sols lessivés présentant toujours des phénomènes de dégradation liés à la présence pratiquement générale de pseudo-gley.

Séries dominantes : LL-3 (*d*) / LL-3*d*.

*Matériaux alluviaux et colluviaux.*

La majorité des échantillons prélevés dans ces formations sont de texture limoneuse ou limono-argileuse, quelques-uns cependant présentent une teneur en sable un peu plus importante et sont limono-sableux ou argilo-sableux.

Les premiers constituent essentiellement des sols peu évolués d'apport, à hydromorphie assez marquée pour les plus lourds d'entre eux. Les autres présentent soit le même degré d'évolution, soit représentent des sols alluviaux calciques lorsqu'une certaine quantité de calcaire est répartie dans la masse du matériau.

Séries dominantes : VL-3*a* / VA-7*a*,
VA-2*ac*.

Séries associées : VE-4*ac* / VY-2*ac*,
VL-4*b*.

*Produits hétérogènes de pente.*

Sous cet intitulé sont regroupés des produits de solifluxion et de remaniement issus de l'action de l'érosion sur diverses formations superficielles.

Suivant le contexte régional, la texture varie assez fortement : limoneuse à limono-sableuse, sablo-argileuse à argileuse localement.

L'économie en eau est le plus souvent favorable à modérée, liée à la position topographique. Certains matériaux lourds peuvent cependant être imparfaitement drainés.

Selon la nature du matériau et l'ancienneté de la mise en place, les sols varient entre le type sol brun et le type sol brun lessivé :

Séries dominantes : PL-3*b* / PE-2*b* (*l*) / PL-2*l*,
PA-2*b*.

Séries associées : PY-1 (*l*) / PU-3 (*l*).

*Argiles d'altération du calcaire* (moins de 15 p. 100 de calcaire).

Ces produits résultent d'une altération importante et probablement assez ancienne, de formations tertiaires très calcaires. Les échantillons ont été prélevés soit dans des matériaux en place, soit légèrement redistribués dans le paysage, mais sans influence de matériaux allochtones. La texture est toujours argilo-limoneuse à argileuse lourde, la structure est toujours très bonne : polyédrique angulaire très bien développée ; la perméabilité y est très favorable.

Les sols constituent le plus souvent des rendzines brunifiées ou des sols bruns eutrophes.

Séries dominantes : KO-1*be* / KA-1*be*,
KO-1*rb* / KA-1*rb*.

*Argiles sédimentaires.*

Ces matériaux très lourds présentent des caractéristiques liées aux conditions de sédimentation qui influent fortement sur les possibilités d'évolution. La structure en est généralement assez défavorable, à faces de dissociation horizontales ou sub-horizontales et se traduit par de faibles possibilités de percolation.

Une endohydromorphie y est, de ce fait, souvent assez marquée.

De texture le plus souvent argileuse lourde ou argilo-limoneuse, certains faciès peuvent être argilo-sableux ou plus rarement sablo-argileux.

La teneur en calcaire, quelquefois présent, est toujours assez faible.

(1) Les symboles utilisés pour les différents sols sont ceux proposés par JAMAGNE et coll. (1967).

TABL

*Caractéristiques moyennes*

| | pH eau | Argile | Limon fin | Limon grossier | Sable |
|---|---|---|---|---|---|
| *Limons non dégradés* | | | | | |
| Organiques | 6,13 | 23,0 | 21,5 | 40,9 | 14,7 |
| Non organiques | 6,00 | 19,8 | 20,5 | 41,1 | 15,0 |
| *Limons dégradés* | | | | | |
| Organiques | 5,28 | 23,0 | 25,8 | 38,9 | 12,5 |
| Non organiques | 5,28 | 18,9 | 24,4 | 46,6 | 9,5 |
| *Colluvions et alluvions* | | | | | |
| Organiques | 6,92 | 31,1 | 28,5 | 30,2 | 9,0 |
| Non organiques | 6,21 | 33,8 | 21,9 | 25,7 | 13,0 |
| *Produits hétérogènes de pente* | | | | | |
| Organiques | 6,56 | 31,3 | 16,1 | 21,1 | 31,6 |
| Non organiques | 6,50 | 23,5 | 17,7 | 28,1 | 27,3 |
| *Argiles d'altération du calcaire* | | | | | |
| Organiques | 7,70 | 60,2 | 11,6 | 19,4 | 7,6 |
| Non organiques | 7,58 | 45,1 | 12,4 | 22,4 | 13,9 |
| *Argiles sédimentaires* | | | | | |
| Organiques | 6,59 | 42,9 | 15,0 | 12,3 | 29,1 |
| Non organiques | 6,40 | 38,8 | 14,4 | 20,1 | 20,0 |
| *Matériaux calcaires* | | | | | |
| Organiques | 8,05 | 42,1 | 14,8 | 15,5 | 20,7 |
| Non organiques | 8,12 | 29,9 | 14,5 | 20,7 | 32,5 |

Les sols développés sont généralement du type de sols bruns eutrophes ou sols bruns modaux. Certains d'entre eux présentent des caractères vertiques assez typiques.

Séries dominantes : SO-4*b* / SA-3*b*,
SO-2*be*.

Séries associées : SU-2*b* / SA-2*be*.

*Matériaux calcaires* (plus de 15 p. 100 de calcaire).

Ont été regroupés sous cette dénomination tous les matériaux présentant une teneur en $CaCO_3$ supérieure à 15 p. 100.

La majorité des échantillons provient de matériaux assez hétérogènes situés sur pentes et fortement influencés par des substrats soit calcaires, soit crayeux. De texture limono-sableuse, calcarifère, ils sont tous favorablement drainés et développés en sols bruns calciques.

D'autres sont issus d'une altération en place essentiellement mécanique de la craie sénonienne et constituent des rendzines grises.

Lorsque déplacés et accumulés en bas de pente ou dans les dépressions, ils sont considérés comme sols d'apport calcimorphes.

Quelques échantillons ont d'autre part été prélevés dans des sols bruns calcaires développés dans des matériaux sédimentaires marneux ou argilo-calcaires, imparfaitement drainés.

Séries dominantes : PE*c*-1*bc*,
CC-1*rc* / CC*e*-1*rc*.

Séries associées : VE*c*-1*ac*,
SO*c*-3*bc*.

EAU 2

*des différentes formations*

| MO | log 10 IS | log 10 K | Rétention pF 2,5 | Flétrissemt pF 4,2 | Eau utile | Limite liquidité | Limite plasticité | Indice de plasticité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 1,79 | 1,03 | 26,0 | 11,1 | 14,9 | 35,9 | 21,9 | 14,0 |
| 3,64 | 1,14 | 1,25 | 28,9 | 12,4 | 16,5 | 40,2 | 27,6 | 12,6 |
| 0,00 | 1,73 | 0,96 | 25,7 | 10,2 | 15,5 | 35,4 | 21,6 | 13,8 |
| 2,60 | 1,28 | 1,05 | 25,8 | 8,6 | 17,2 | 33,9 | 24,6 | 9,3 |
| 0,00 | 1,04 | 0,68 | 31,8 | 16,5 | 15,3 | 49,1 | 27,4 | 21,6 |
| 5,13 | 0,74 | 1,17 | 36,4 | 20,1 | 16,3 | 55,8 | 34,1 | 21,7 |
| 0,00 | 1,36 | 1,12 | 27,8 | 16,0 | 11,8 | 44,6 | 23,7 | 20,9 |
| 3,36 | 1,03 | 1,28 | 26,8 | 13,5 | 13,3 | 41,1 | 26,5 | 14,6 |
| 0,00 | 1,24 | 1,14 | 56,0 | 35,2 | 20,8 | 90,7 | 40,9 | 49,8 |
| 3,54 | 0,86 | 1,27 | 40,3 | 25,7 | 14,6 | 66,1 | 32,6 | 33,5 |
| 0,00 | 1,28 | 0,74 | 34,8 | 21,5 | 13,3 | 61,1 | 28,8 | 32,3 |
| 5,51 | 0,85 | 1,25 | 37,1 | 22,1 | 15,0 | 60,0 | 31,3 | 28,7 |
| 0,00 | 1,24 | 1,27 | 41,4 | 24,7 | 16,7 | 67,9 | 33,3 | 34,6 |
| 2,91 | 0,91 | 1,24 | 25,3 | 14,5 | 10,8 | 41,8 | 24,2 | 17,6 |

Dans un souci d'analyse, chaque groupe a été scindé en deux sous-groupes : l'un constitué par les horizons organiques de surface, l'autre ne comprenant que les horizons profonds dépourvus de matière organique. Sur le plan pédologique, cette distinction correspond approximativement à une distinction entre les horizons A et les horizons B.

### b. — *Techniques analytiques*

L'analyse granulométrique a été réalisée par densimétrie pour les fractions fines inférieures à 50 μ et par tamisage pour les fractions supérieures. Pour les matériaux contenant moins de 15 p. 100 de calcaire, il s'agit de la granulométrie après destruction du calcaire, alors que les matériaux calcaires sont analysés sans destruction des carbonates.

Le taux de matière organique est évalué en multipliant par deux le taux de carbone dosé par la méthode Anne.

La stabilité de structure est caractérisée au moyen des tests (HÉNIN *et al.*, 1958) de tamisage et de percolation sur des agrégats échantillonnés après un séchage à l'air libre, en salle, pendant au moins deux mois. En effet, comme d'autres auteurs (MONNIER et KONAN, 1968), nous avons constaté un accroissement de la stabilité de structure par un séchage à l'air prolongé. Au-delà de deux mois, cette propriété ne varie plus avec le temps de séchage.

Le point de flétrissement (pF 4,2) est déterminé en appliquant une pression de 16 kg/cm² sur une membrane en collodion. La capacité de rétention est estimée conventionnellement (pF 2,5) par l'eau retenue sous une pression de 0, 320 kg.

Les limites d'Atterberg sont déterminées suivant la norme A. S. T. M. décrite dans les ma-

nuels de laboratoire routier (PELTIER, 1954) avec une simplification (NORMAN, 1959) en tenant compte de la relation :

$$LL = H\left(\frac{N}{25}\right)^{tg\,\beta}$$

LL : limite de liquidité
H : humidité pondérale
N : nombre de chutes de la coupelle
tg β : pente de la droite de régression calculée.

Cette équation permet d'effectuer la correction directement en prenant tg β = 0,078 lorsque LL est inférieur à 50 et tg β = 0,057 lorsque LL est supérieure à 50. Ces valeurs obtenues pour les sols de l'Aisne sont légèrement inférieures à celles (0,092) annoncées par les auteurs anglais (Road Research Laboratory). Toutefois, l'utilisation de cette méthode beaucoup plus rapide n'accroît l'erreur relative que de 0,5 p. 100.

### c. — *Techniques de dépouillement*

Les relations entre les limites d'Atterberg et la composition granulométrique ont été analysées au moyen des régressions multiples selon la démarche suivante :

— étude de la matrice de corrélation linéaire et choix des variables intéressantes ;
— étude des régressions multiples possibles et recherche parmi elles de la meilleure régression.

Les relations entre propriétés sont caractérisées par le calcul de régressions linéaires simples s'il existe une hiérarchie dans la dépendance des variables et de régressions linéaires orthogonales ou régressions selon les moindres rectangles (DAGNÉLIE, 1969), dans le cas contraire.

## RÉSULTATS

### 1. — *Influence de la texture sur les limites d'Atterberg*

D'une manière générale, l'influence de la granulométrie sur les propriétés du sol reste difficile à définir car chaque fraction granulométrique possède une influence propre qu'il convient de préciser. On pourrait, *a priori*, en première approximation, traduire ce fait par la relation linéaire suivante pour une propriété F :

$$F = k_1x_1 + k_2x_2 + \cdots + k_{n-1}x_{n-1} + k_n \text{ (pour } n - 1 \text{ fractions granulométriques)}$$

Nous obtenons $n$ coefficients généralement liés par une relation de dépendance. Par commodité, dans ce qui suit, nous les dénommerons intensité d'action. Celle-ci correspond à la variation de la propriété étudiée pour un accroissement de 1 p. 100 de la fraction granulométrique mise en cause. En d'autres termes, il s'agit de la dérivée partielle $\frac{\delta F}{\delta x_i}$.

L'ensemble des résultats des calculs figurent au tableau 3.

L'examen des matrices de corrélation n'a permis de retenir que les fractions suivantes : argile, limon fin et sables totaux.

Sous le terme *régression systématique*, on entend les résultats obtenus en conservant ces trois variables.

Sous le terme *meilleure régression*, on entend, pour chaque type de matériau étudié, la régression possédant le coefficient de corrélation multiple le plus élevé. Dans ce cas, certaines variables, non influentes, ne figurent plus dans l'équation de régression.

TABLEAU 3

*Facteurs de variation des limites d'Atterberg*
(Matériaux dépourvus de matière organique)

| | | Régressions systématiques | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | L*f* | S | Cte | CCM |
| LL | A ..... | 0,621 | — 0,177 | — 0,078 | 26,6 | 0,762 *** |
| | B ..... | 0,895 | 0,168 | 0,137 | 8,7 | 0,778 *** |
| | C ..... | 1,245 | — 0,210 | 0,101 | 15,4 | 0,971 *** |
| | D ..... | 0,786 | 0,177 | 0,138 | 12,8 | 0,836 *** |
| | E ..... | 1,217 | — 3,128 | — 2,725 | 74,8 | 0,944 *** |
| | F ..... | 0,679 | — 0,428 | — 0,077 | 40,7 | 0,736 *** |
| | G ..... | 0,984 | — 1,229 | 0,735 | 59,9 | 0,749 *** |
| LP | A ..... | — 0,129 | 0,057 | — 0,066 | 24,6 | 0,383 * |
| | B ..... | 0,000 | — 0,105 | — 0,063 | 25,1 | 0,178 NS |
| | C ..... | 0,546 | — 0,135 | 0,359 | 11,0 | 0,964 *** |
| | D ..... | 0,299 | 0,136 | 0,097 | 9,1 | 0,705 *** |
| | E ..... | 0,807 | — 0,961 | — 0,828 | 9,9 | 0,895 ** |
| | F ..... | 0,411 | 0,279 | 0,140 | 2,9 | 0,645 *** |
| | G ..... | 0,245 | — 0,604 | — 0,459 | 41,5 | 0,588 * |
| IP | A ..... | 0,750 | — 0,234 | — 0,012 | 2,0 | 0,888 *** |
| | B ..... | 0,896 | 0,273 | 0,201 | — 16,3 | 0,852 *** |
| | C ..... | 0,712 | — 0,061 | — 0,250 | 3,5 | 0,854 *** |
| | D ..... | 0,495 | 0,042 | 0,047 | 3,2 | 0,766 *** |
| | E ..... | 0,410 | — 2,167 | — 1,897 | 64,9 | 0,962 *** |
| | F ..... | 0,268 | — 0,707 | — 0,217 | 37,8 | 0,683 *** |
| | G ..... | 0,737 | — 0,628 | — 0,279 | 18,8 | 0,757 *** |

| | | Meilleures régressions | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | L*f* | S | Cte | CCM |
| LL | A ..... | 0,621 | *— 0,177* | *— 0,078* | 26,6 | 0,762 *** |
| | B ..... | 0,688 | — | — | 19,6 | 0,786 *** |
| | C ..... | 1,301 | — | — | 8,7 | 0,974 *** |
| | D ..... | 0,751 | — | *0,078* | 18,7 | 0,838 *** |
| | E ..... | 1,217 | *— 3,128* | *— 2,725* | 74,8 | 0,944 *** |
| | F ..... | 0,806 | — | — | 26,6 | 0,746 *** |
| | G ..... | 0,984 | *— 1,229* | *— 0,735* | 59,9 | 0,749 *** |
| LP | A ..... | — 0,129 | *0,057* | *— 0,066* | 24,6 | 0,383 * |
| | B ..... | *0,087* | — | — | 19,6 | 0,255 NS |
| | C ..... | 0,546 | *— 0,135* | 0,359 | 11,0 | 0,964 *** |
| | D ..... | 0,299 | *0,136* | *0,097* | 9,1 | 0,705 *** |
| | E ..... | 0,807 | *— 0,961* | *— 0,828* | 9,9 | 0,895 *** |
| | F ..... | 0,411 | *0,279* | *0,140* | 2,9 | 0,645 *** |
| | G ..... | — | *— 0,562* | — 0,615 | 54,2 | 0,602 ** |
| IP | A ..... | 0,757 | — 0,230 | — | 1,6 | 0,891 *** |
| | B ..... | 0,896 | *0,273* | *0,201* | — 16,3 | 0,852 *** |
| | C ..... | 0,733 | — | *— 0,248* | 1,1 | 0,873 *** |
| | D ..... | 0,486 | — | — | 5,7 | 0,780 *** |
| | E ..... | 0,410 | — 2,167 | — 1,897 | 64,9 | 0,962 *** |
| | F ..... | 0,268 | *— 0,707* | *— 0,217* | 37,8 | 0,683 *** |
| | G ..... | 0,737 | *— 0,628* | *— 0,279* | 18,6 | 0,757 *** |

A Limons non dégradés
B Limons dégradés
C Colluvions et alluvions
D Produits hétérogènes de pente
E Argiles altération calcaire
F Argiles sédimentaires
G Matériaux calcaires.

CCM : coefficient de corrélation multiple
NS : non significatif
* : significatif au seuil 5 p. 100
** : significatif au seuil 1 p. 100
*** : significatif au seuil 0,1 p. 100.
En italique : coefficients non significatifs dans l'analyse progressive ascendante de la variance.

TABLEAU 3 (*suite*)

| | | Régressions dominantes | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | L | S | Cte | CCM |
| LL | A | 0,629 | — | — | 21,5 | 0,725 *** |
| | B | 0,688 | — | — | 19,6 | 0,786 *** |
| | C | 1,301 | — | — | 8,7 | 0,974 *** |
| | D | 0,750 | — | — | 21,2 | 0,833 *** |
| | E | 2,916 | — | — | — 84,7 | 0,877 ** |
| | F | 0,806 | — | — | 26,6 | 0,746 *** |
| | G | — | — | — 1,530 | 99,5 | 0,670 ** |
| LP | A | — 0,120 | — | — 0,070 | 25,7 | 0,382 * |
| | B | — | — | — | 21,6 | — |
| | C | 0,594 | — | 0,362 | 5,7 | 0,964 *** |
| | D | 0,271 | — | — | 15,2 | 0,682 *** |
| | E | 1,326 | — | — | — 38,9 | 0,887 ** |
| | F | 0,249 | — | — | 18,1 | 0,644 *** |
| | G | — | — | — 0,705 | 47,9 | 0,585 * |
| IP | A | 0,757 | — 0,230 | — | 1,6 | 0,891 *** |
| | B | 0,601 | — | — | 0,0 | 0,810 *** |
| | C | 0,777 | — | — | — 2,5 | 0,863 *** |
| | D | 0,486 | — | — | 5,7 | 0,780 *** |
| | E | 0,410 | — 2,167 | — 1,897 | 64,9 | 0,962 *** |
| | F | 0,557 | — | — | — 8,5 | 0,670 *** |
| | G | 0,956 | — | — | — 5,7 | 0,702 ** |

A Limons non dégradés
B Limons dégradés
C Colluvions et alluvions
D Produits hétérogènes de pente
E Argiles altération calcaire
F Argiles sédimentaires
G Matériaux calcaires.

CCM : coefficient de corrélation multiple
* : significatif au seuil 5 p. 100
** : significatif au seuil 1 p. 100
*** : significatif au seuil 0,1 p. 100.

Enfin, si cette régression est la meilleure estimation de la propriété étudiée, on peut souvent lui substituer une relation plus simple que nous appellerons *régression dominante*. La part supplémentaire de variance expliquée par l'introduction d'une nouvelle variable est testée selon le critère F au niveau 5 p. 100 ; ainsi certaines variables d'influence faible, non significative, peuvent disparaître à leur tour.

Les coefficients de régression obtenus appellent les commentaires suivants :

*a*) la limite de plasticité (LP) pour les matériaux limoneux(groupes 1 et 2) ne dépend pas ou très peu du taux d'argile. En conséquence, l'accroissement du domaine de plasticité (IP = LL - LP) ne dépend que de la variation bien connue de la limite de liquidité (LL) en fonction du taux d'argile ;

*b*) l'intensité d'action des limons fins est presque toujours de signe opposé à celle de l'argile (aussi est-il nécessaire de traiter les limons séparément). Les limons fins interviennent généralement en abaissant les limites. Tout se passe comme si leur présence réduisait le nombre de pores effectivement disponibles pour l'eau ;

*c*) les sables agissant dans le même sens que les limons, c'est-à-dire en modérant

l'action de l'argile. Cette modération est d'autant plus importante que le taux d'argile est élevé.

Ces résultats ne s'accordent pas exactement avec ceux de COMBEAU (1964) : le coefficient de régression pour la variable (argile + limon) est inférieur à celui trouvé ici pour l'argile seule. Cela n'a rien d'étonnant puisque les limons, nous venons de le montrer, ont une action, ou nulle, ou opposée à celle de l'argile.

### 2. — *Influence de la matière organique et relation avec la texture*

L'étude des relations linéaires similaires au paragraphe 1, mais en incluant la matière organique comme variable supplémentaire, conduit (tabl. 4) aux remarques suivantes :

*a*) la matière organique augmente considérablement la limite de liquidité ; l'accroissement de la limite de liquidité pour un pour cent de matière organique est de plus en plus faible au fur et à mesure que le taux de matière organique croît, au point de ne plus modifier significativement cette limite dans les matériaux ou très argileux ou très calcaires ;

TABLEAU 4

*Facteurs de variation des limites d'Atterberg*
(Matériaux organiques et non organiques)

| | | Régressions systématiques | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | L*f* | S | MO | Cte | CCM |
| LL | A | 0,663 | — 0,137 | — 0,071 | 2,370 | 23,7 | 0,849 |
| | B | 0,880 | 0,113 | 0,150 | 2,243 | 9,8 | 0,789 |
| | C | 0,880 | — 0,254 | — 0,202 | 1,848 | 27,2 | 0,869 |
| | D | 0,869 | 0,002 | 0,010 | 1,728 | 15,7 | 0,873 |
| | E | 0,802 | — 3,184 | — 1,896 | 1,117 | 92,4 | 0,885 |
| | F | 0,812 | — 0,236 | 0,056 | 0,981 | 27,3 | 0,748 |
| | G | 1,032 | — 0,992 | — 0,517 | — 0,842 | 46,5 | 0,826 |
| LP | A | 0,053 | 0,059 | — 0,054 | 2,080 | 19,6 | 0,819 |
| | B | 0,085 | 0,089 | — 0,003 | 1,587 | 17,7 | 0,731 |
| | C | 0,275 | 0,099 | — 0,054 | 2,209 | 13,4 | 0,867 |
| | D | 0,315 | 0,069 | 0,012 | 1,838 | 11,8 | 0,865 |
| | E | 0,528 | — 1,140 | — 0,831 | 1,809 | 25,8 | 0,862 |
| | F | 0,372 | 0,285 | 0,141 | 1,088 | 4,6 | 0,719 |
| | G | 0,265 | — 0,523 | — 0,311 | 0,143 | 34,6 | 0,666 |
| IP | A | 0,610 | — 0,201 | — 0,016 | 0,250 | 4,2 | 0,806 |
| | B | 0,794 | 0,044 | 0,152 | 0,656 | — 7,8 | 0,749 |
| | C | 0,590 | — 0,350 | — 0,146 | — 0,354 | 13,6 | 0,783 |
| | D | 0,558 | — 0,067 | 0,000 | — 0,093 | 3,7 | 0,844 |
| | E | 0,264 | — 2,077 | — 1,260 | — 0,737 | 67,7 | 0,880 |
| | F | 0,440 | — 0,501 | — 0,084 | — 0,106 | 22,7 | 0,705 |
| | G | 0,766 | — 0,472 | — 0,207 | — 0,390 | 12,0 | 0,856 |

A Limons non dégradés
B Limons dégradés
C Colluvions et alluvions
D Produits hétérogènes de pente
E Argiles altération calcaire
F Argiles sédimentaires
G Matériaux calcaires.

CCM : Coefficient de corrélation multiple.
Toutes les régressions figurant dans ce tableau sont significatives au seuil 0,1 p. 100.
En italique : coefficients non significatifs dans l'analyse progressive ascendante de la variance.

TABLEAU 4 (*suite*)

| | | Meilleures régressions | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | L*f* | S | MO | Cte | CCM |
| LL | A | 0,663 | — *0,137* | — *0,071* | 2,370 | 23,7 | 0,849 |
| | B | 0,826 | — | *0,103* | 2,053 | 14,5 | 0,795 |
| | C | 0,916 | — | — *0,107* | 1,997 | 17,7 | 0,869 |
| | D | 0,864 | — | — | 1,709 | 16,2 | 0,877 |
| | E | 0,625 | — 3,383 | — 1,966 | — | 107,3 | 0,886 |
| | F | 0,751 | — *0,332* | — | 0,890 | 32,9 | 0,754 |
| | G | 1,058 | — 0,994 | — 0,513 | — | 40,4 | 0,827 |
| LP | A | — | — | — 0,071 | 2,031 | 22,3 | 0,822 |
| | B | — | — | — *0,044* | 1,396 | 21,8 | 0,747 |
| | C | 0,253 | — | — *0,091* | 2,151 | 17,1 | 0,871 |
| | D | 0,312 | *0,046* | — | 1,828 | 12,7 | 0,868 |
| | E | 0,528 | — 1,140 | — 0,631 | 1,809 | 25,8 | 0,862 |
| | F | 0,372 | *0,265* | *0,141* | 1,065 | 4,6 | 0,719 |
| | G | 0,260 | — 0,523 | — 0,311 | — | 35,0 | 0,675 |
| IP | A | 0,614 | — 0,186 | — | *0,260* | 3,6 | 0,808 |
| | B | 0,773 | — | — *0,134* | *0,582* | — 6,0 | 0,760 |
| | C | 0,783 | — *0,350* | — *0,146* | — *0,354* | 13,6 | 0,783 |
| | D | 0,564 | — *0,072* | — | — | 3,4 | 0,849 |
| | E | 0,264 | — 2,077 | — 1,260 | — *0,737* | 67,7 | 0,880 |
| | F | 0,531 | — *0,361* | — | — | 14,5 | 0,718 |
| | G | 0,766 | — 0,472 | — *0,207* | — *0,990* | 12,0 | 0,856 |

| | | Régressions dominantes | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | L*f* | S | MO | Cte | CCM |
| LL | A | 0,679 | — | — | 2,428 | 19,3 | 0,847 |
| | B | 0,713 | — | — | 1,945 | 18,1 | 0,778 |
| | C | 0,948 | — | — | 1,994 | 15,4 | 0,868 |
| | D | 0,864 | — | — | 1,709 | 16,2 | 0,877 |
| | E | 0,625 | — 3,383 | — 1,966 | — | 107,3 | 0,886 |
| | F | 0,793 | — | — | 0,967 | 26,1 | 0,748 |
| | G | 1,058 | — 0,994 | — 0,513 | — | 40,4 | 0,827 |
| LP | A | — | — | — 0,071 | 2,031 | 22,3 | 0,822 |
| | B | — | — | — | 1,364 | 21,4 | 0,740 |
| | C | 0,280 | — | — | 2,148 | 15,1 | 0,866 |
| | D | 0,318 | — | — | 1,858 | 13,2 | 0,867 |
| | E | 0,528 | — 1,140 | — 0,831 | 1,809 | 25,8 | 0,862 |
| | F | 0,215 | — | — | 0,852 | 19,1 | 0,706 |
| | G | 0,260 | — 0,523 | — 0,311 | — | 35,0 | 0,675 |
| IP | A | 0,590 | — 0,196 | — | — | 4,7 | 0,799 |
| | B | 0,569 | — | — | — | 0,3 | 0,715 |
| | C | 0,688 | — | — | — | — 0,4 | 0,780 |
| | D | 0,558 | — | — | — | 2,4 | 0,847 |
| | E | 0,381 | — 1,946 | — 1,213 | — | 57,8 | 0,880 |
| | F | 0,574 | — | — | — | 7,4 | 0,697 |
| | G | 0,984 | — 0,368 | — | — | — 4,6 | 0,842 |

A Limons non dégradés
B Limons dégradés
C Colluvions et alluvions
D Produits hétérogènes de pente
E Argiles altération calcaire
F Argiles sédimentaires
G Matériaux calcaires.

CCM : Coefficient de corrélation multiple.
Toutes les régressions figurant dans ce tableau sont significatives au seuil 0,1 p. 100.

VARIATION DE L'INTENSITE D'ACTION
DE LA MATIERE ORGANIQUE SUR L'INDICE DE PLASTICITE

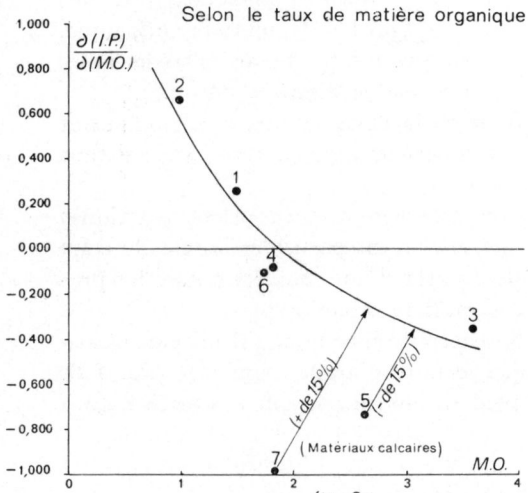



fig : 2a

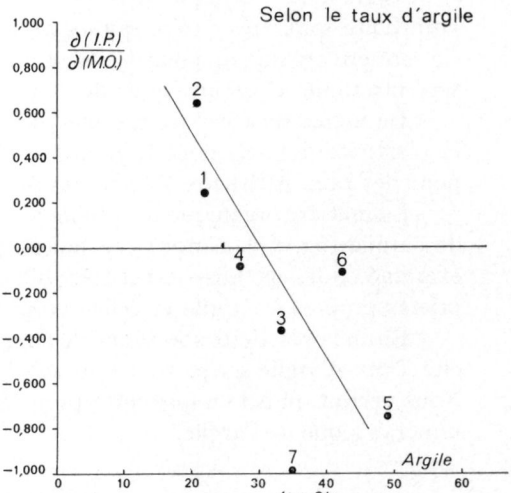



fig : 2b

1 – Limons non dégradés
2 – Limons dégradés
3 – Colluvions et alluvions
4 – Produits hétérogènes de pente
5 – Argiles d'altération du calcaire
6 – Argiles sédimentaires
7 – Matériaux calcaire

VARIATION DE L'INTENSITE D'ACTION
DE L'ARGILE SUR L'INDICE DE PLASTICITE

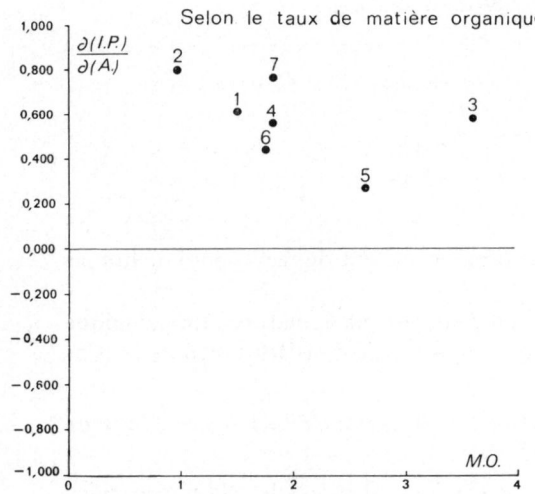



fig : 2c

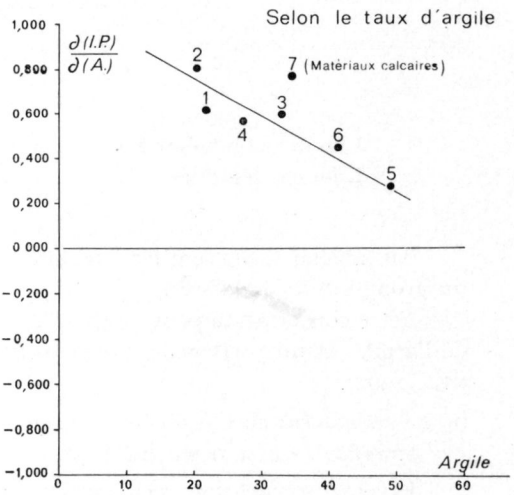



fig : 2 d

FIG. 2. —

*b*) l'action sur la limite de plasticité est sensiblement identique à celle sur la limite de liquidité mais avec une intensité moindre ;

*c*) le caractère plastique des sols se traduit par l'indice de plasticité, dont les variations sont très intéressantes à considérer eu égard à la matière organique. La matière organique, pour des taux inférieurs à 1,8 p. 100 tend à accroître le caractère plastique, alors que pour des taux supérieurs, elle le diminue (fig. 2 *a*).

De même on constate un effet modérateur de la matière organique, réduisant la plasticité des sols dont le taux d'argile est supérieur à 30 p. 100, l'augmentant pour des taux inférieurs à cette limite (fig. 2 *b*).

La matière organique ne semble réduire que légèrement les propriétés plastiques de l'argile (fig. 2 *c*). Notons cependant que cet effet n'est pas indépendant de celui examiné ci-dessus, aussi est-il très difficile de séparer d'une manière totale les propriétés propres à l'argile et celles propres à la matière organique.

Enfin la plasticité spécifique de l'argile ou « activité spécifique » (Indice de plasticité/Taux d'argile en p. 100) diminue lorsque le taux d'argile augmente (fig. 2 *d*). Nous verrons plus loin que cette propriété peut dépendre par ailleurs de la nature minéralogique de l'argile.

### 3. — *Influence de la pédogenèse*

Cette influence reste relativement faible, abstraction faite des modifications quantitatives de texture ou de matière organique obtenues par l'action des facteurs pédogénétiques, dont nous venons de parler ci-dessus.

Cependant, il est possible de citer quelques exceptions :

a) *Dans le phénomène d'accumulation, on constate un accroissement de « la plasticité spécifique » de l'argile* (tabl. 5).

TABLEAU 5

*Variation de la plasticité spécifique de l'argile*

| | Horizons A | | Horizons B |
|---|---|---|---|
| | — | | — |
| Limons non dégradés..... | 0,487 | < | 0,750 |
| Limons dégradés ..... | 0,645 | < | 0,896 |

Au tableau 5, figurent les intensités d'action (coefficient de régression) de limons du groupe des sols lessivés.

Cette constatation peut s'expliquer par un changement de nature minéralogique de l'argile, la proportion de montmorillonite augmentant dans les horizons B (CAMEZ, 1962).

b) *Le phénomène de « dégradation » s'accompagne d'un accroissement de la « plasticité spécifique » de l'argile* (tabl. 5).

Diverses explications peuvent être apportées à ce phénomène. Nous pourrions invoquer, pour les horizons B, une illuviation plus importante, mais le raisonnement serait erroné pour les horizons A. Par contre, on peut penser que dans ces horizons

beaucoup plus pauvres en argile que leurs homologues non dégradés, celle-ci y possède une plus grande intensité d'action.

En conclusion, la raison de ce comportement différent de l'argile pourrait être d'origine quantitative pour les horizons appauvris et d'origine qualitative pour les horizons d'accumulation. Par ailleurs, une teneur en hydroxydes libres plus élevée peut accroître le caractère plastique (COMBEAU, 1964).

c) *La nature de la matière organique agit sur la plasticité des sols.*

Nous avons vu que sur le plan quantitatif la matière organique pouvait avoir une action différente suivant le taux.

Les différents types d'humus peuvent avoir des propriétés plastiques très différentes. Ainsi on constate que les matières organiques bien humifiées sont beaucoup plus plastiques que les matières organiques fibreuses.

### 4. — *Relation entre limites d'Atterberg et stabilité de structure*

La stabilité de structure évaluée par le test de HÉNIN *et al.* (1958) tient compte implicitement des différentes composantes agissant sur la résistance à la désagrégation. L'une d'entre elles est particulièrement importante : la cohésion du matériau. Ce terme figure par exemple dans la relation exprimant le schéma de Yoder sur l'éclatement des agrégats terreux sous l'influence de l'eau :

$$S = C - \frac{2T_1 \cos \alpha}{r}$$

S Stabilité
C Cohésion à saturation d'eau
T Tension superficielle du liquide
$r$ Rayon du capillaire

Les limites d'Atterberg pouvant s'exprimer en terme de cohésion, nous avons cherché à voir s'il existait un lien entre les deux notions.

La relation calculée sur l'ensemble des échantillons est de nature hyperbolique (fig. 3), entre log 10 Is et la marge de liquidité, c'est-à-dire la différence entre la limite de liquidité et la capacité de rétention. Les grandeurs comparées ne sont pas en corrélation étroite car la stabilité de structure ne dépend pas que de la cohésion.

Ainsi, la matière organique, à marge de liquidité égale, accroît la stabilité de structure :

— matériaux non organiques (teneur inférieure à 0,3 p. 100) :

$$\log 10\, Is = 0{,}58 + \frac{10{,}8}{LL\text{-}CR} \qquad (1)$$

$$r = 0{,}694^{***}$$

— matériaux organiques :

$$\log 10\, Is = 0{,}66 + \frac{3{,}2}{LL\text{-}CR} \qquad (2)$$

$$r = 0{,}400^{**}$$

Ainsi, pour faire passer l'indice d'instabilité de 1,8 à 1,5, il faudrait faire passer la marge de liquidité de 8,8 à 11,7 pour les horizons non organiques et de 2,8 à 3,8 pour les horizons organiques. Il faut donc un accroissement du taux d'argile trois fois plus grand en sol non organique.

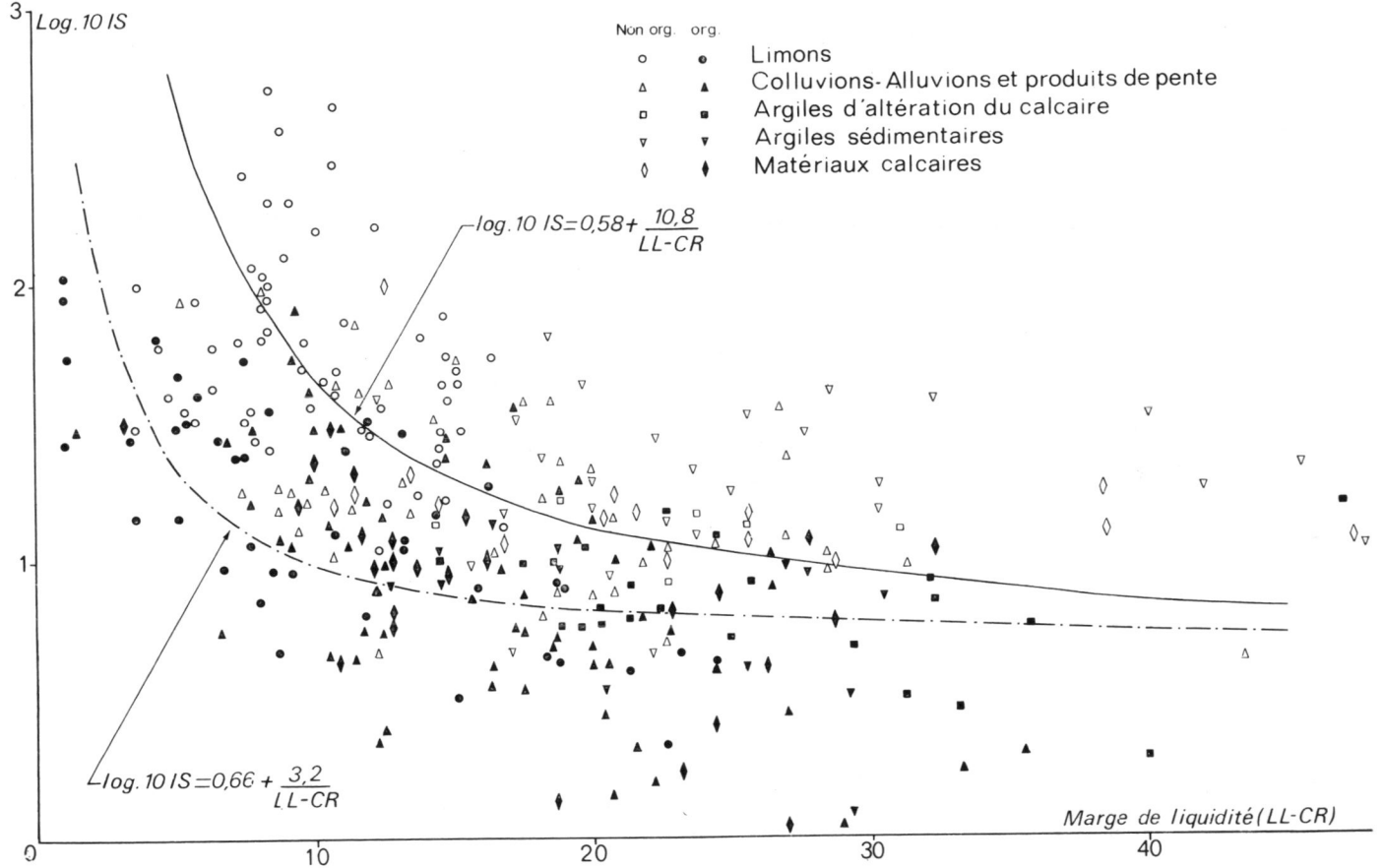



FIG. 3. — *Relation entre la stabilité structurale et la marge de liquidité*

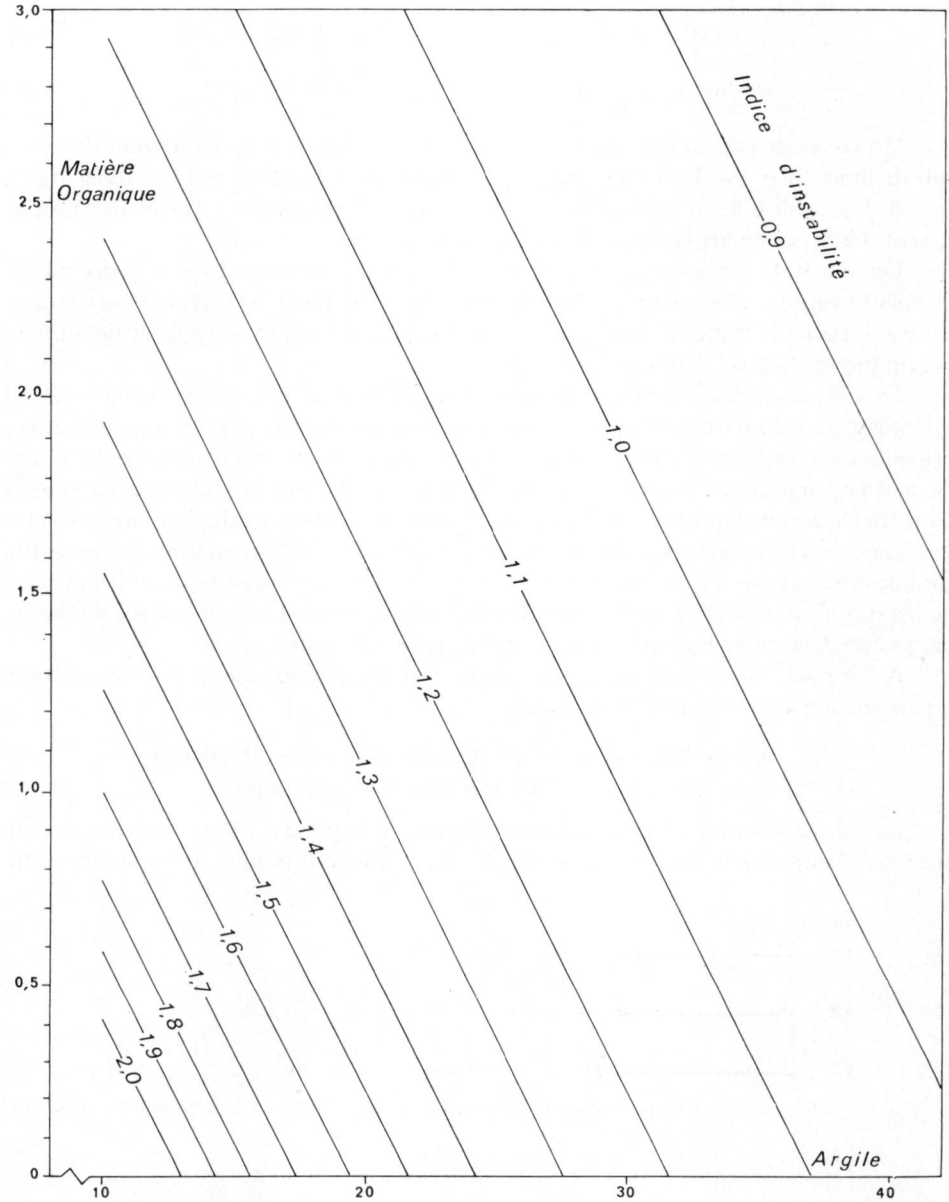



FIG. 4. — *Influence de l'argile et de la matière organique sur la stabilité des sols de limons forestiers*

Nous pouvons examiner le cas des sols de limons en tenant compte des équations de régression nous donnant la variation respective de la limite de liquidité et de la capacité de rétention :

$$LL = 0{,}649\ A + 3{,}248\ MO + 15{,}6 \qquad r = 0{,}905^{***} \qquad (3)$$

$$CR = 0{,}426\ A + 1{,}613\ MO + 14{,}1 \qquad r = 0{,}800^{***} \qquad (4)$$

d'où

$$LL\text{-}CR = 0{,}223\ A + 1{,}635\ MO + 1{,}5 \qquad (5)$$

$$\text{or } \log 10\ Is = 0{,}36 + \frac{7{,}2}{LL\text{-}CR} \qquad r = 0{,}647^{***} \qquad (6)$$

En conséquence, sur le plan cohésion et consistance, il apparaît que dans ces sols de limon, 1 p. 100 de matière organique correspond sensiblement à 7 p. 100 d'argile.

Si l'on utilise les relations (5) et (6), on peut théoriquement tracer des droites d'isostabilité schématisées par un diagramme (fig. 4).

Ces résultats ont été obtenus sur des échantillons provenant en majeure partie de sols forestiers. C'est pourquoi on observe des stabilités de structure assez importantes. L'indice d'instabilité est généralement supérieur, à taux d'argile et de matière organique égal, à celui des sols cultivés.

La notion de complémentarité entre l'argile et la matière organique revêt ici une très grande importance : un sol possèdant 20 p. 100 d'argile et 1,8 p. 100 de matière organique aurait la même stabilité qu'un sol contenant 15 p. 100 d'argile et 2,5 p. 100 de matière organique. En conséquence, le taux de matière organique à entretenir dans un sol serait d'autant plus élevé qu'il contient moins d'argile. Notons que cette tendance va à l'encontre de celle qui tend à s'établir par équilibre naturel. La nécessité connue d'entretenir, en sol très sableux, un taux de matière organique suffisant pour l'existence d'un complexe colloïdal minimum, est également valable en sol de limon, mais cette fois, pour une question de stabilité de structure.

A l'opposé, un sol bien pourvu en argile ne demanderait que peu d'une matière organique active sur le plan biologique.

### 5. — *Remarques sur la position des limites d'Atterberg par rapport aux caractéristiques hydriques*

Le sol possède une série de caractéristiques correspondant à des teneurs en eau données. Leur classement sur une échelle croissante d'humidité montre un ordre

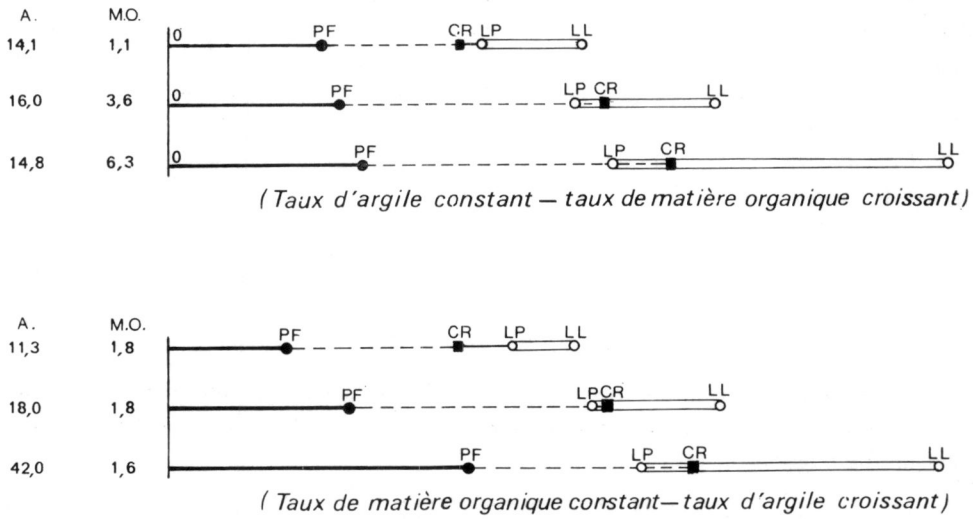



FIG. 5. — *Position relative de la limite de plasticité*

immuable pour certaines d'entre elles, alors que des interversions peuvent intervenir pour d'autres.

Ainsi, on peut remarquer (fig. 5) que la capacité de rétention du sol peut occuper des positions diverses par rapport au domaine de plasticité.

a) *La capacité de rétention se trouve en deçà du domaine de plasticité.*

Il s'agit des sols peu plastiques ayant une teneur faible en matière organique. Le cas se rencontre même dans des horizons $A_2$ de sols de limons fortement lessivés.

b) *La capacité de rétention se situe dans le domaine plastique.*

C'est le cas le plus général. Nous venons de voir que plus elle est proche de la limite de liquidité, moins la structure est stable.

c) *La capacité de rétention se trouve au-delà du domaine de plasticité.*

Cette situation est extrêmement rare. L'écart constaté est toujours de l'ordre de grandeur des erreurs de manipulation et ne permet pas d'interprétation.

Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que la limite de plasticité d'un sol dépend beaucoup moins de sa teneur en argile que n'en dépend la capacité de rétention. Notons cependant que si la comparaison avait été faite avec la capacité au champ, l'ampleur des écarts eût été plus faible puisque cette dernière est surévaluée en sol argileux et sous-évaluée en sol léger si on la confond avec la teneur en eau à pF 2,5 (GRAS, 1961).

En conséquence, il apparaît qu'un sol sera d'autant plus souvent à l'état plastique que sa capacité de rétention sera supérieure à la limite inférieure de plasticité et tendra vers la limite de liquidité, qu'elle ne peut cependant atteindre, celle-ci croissant plus vite que celle-là. Les façons culturales sont alors beaucoup plus difficiles à réaliser.

Certains auteurs (PÉRIGAUD, 1964) sont parvenus à des conclusions similaires, mais en exprimant les limites d'Atterberg en terme de succion. Les sols argileux nécessitent en effet des énergies de succion plus importantes pour une même caractéristique mécanique. La variation du niveau d'énergie à mettre en œuvre décroît en général depuis la limite de liquidité vers la capacité de rétention et la limite de plasticité. Cette dernière est en effet la caractéristique la plus indépendante (pF 2,9).

## DISCUSSION ET CONCLUSION

a) *Les limites d'Atterberg dépendent étroitement de la texture*

Il est impossible d'isoler l'influence de chacune des composantes de la texture. L'examen des résultats montre que l'intensité d'action d'une composante n'est pas constante. Elle dépend :

1. de la valeur de la composante mise en cause ;
2. de celle des autres variables.

Notons que ces composantes peuvent ne pas être totalement indépendantes. La technique de régression multiple ne permet pas de faire la part entre l'interaction de complémentarité et l'interaction vraie, car la somme des variables explicatives est égale à 100.

En conséquence, la recherche d'une loi de variation générale ne peut se faire selon l'hypothèse de linéarité qui considère les effets comme additifs.

Une seconde approximation a été tentée en tenant compte du fait qu'une composante est d'autant plus efficace qu'elle est moins représentée. Ceci conduit à considérer l'action comme proportionnelle non plus à la composante elle-même mais à son logarithme :

— Sols peu organiques :

$$IP = 50 \log \left(\frac{A\ \%}{10}\right)$$

$$* 48{,}9 \log \left(\frac{A\ \%}{8{,}7}\right) \qquad r = 0{,}952\ ***$$

— Sols organiques :

$$IP = 50 \log \left(\frac{A\ \%}{10}\right) - 10 \log \frac{MO\ \%}{1{,}5}$$

$$* 51{,}5 \log \left(\frac{A\ \%}{10{,}7}\right) - 9{,}96 \log \frac{MO\ \%)}{1{,}45} \qquad r = 0{,}863\ ***$$

L'examen des coefficients de ces relations montre que :

— l'indice de plasticité s'annule aux environs de 10 p. 100 d'argile ;

— l'action positive de la matière organique sur la plasticité s'inverse dès le taux de 1,5 p. 100.

L'avantage d'un tel type de relation sur la relation linéaire est de donner une signification physique plus nette aux coefficients.

Notons que le coefficient du premier terme est la moyenne d'un grand nombre de types d'argile. Il dépend en effet de la nature minéralogique de l'argile.

b) *Les limites d'Atterberg permettent de classer les sols selon leur texture*

En matière d'appréciation de la texture, le test de terrain consiste à reproduire sommairement le test d'Atterberg. Aussi faut-il, pour s'affranchir du caractère structure, pétrir en partant d'un échantillon suffisamment humide, c'est-à-dire légèrement au-dessus de la limite de plasticité.

c) *L'indice d'instabilité de structure est en relation avec les limites d'Atterberg*

Il existe une complémentarité d'action de l'argile et de la matière organique. Cependant, l'activité biologique tend à rendre impossible cette complémentarité. En sol cultivé, les techniques d'entretien organique ont au contraire pour but de l'utiliser. La considération des limites d'Atterberg permet d'aborder la question

* Valeurs exactes calculées.

fondamentale de ce taux optimum de matière organique. L'agriculteur a l'habitude de répartir uniformément ses apports de matière organique, quelle que soit la nature des terres. La teneur du sol devient alors le reflet du coefficient de destruction qui est en général d'autant plus faible que la structure est plus lourde. On peut donc concevoir une très faible utilité des restitutions organiques dans certains types de terres, naturellement bien structurés. La politique de l'agriculteur devrait être orientée par les considérations suivantes :

L'expérience locale indique que de bonnes conditions culturales sont obtenues par une certaine stabilité minimum, par exemple 1,2. Pour cette stabilité et à une teneur en argile donnée (par exemple 13 p. 100), la figure 4 fait correspondre une certaine teneur en matière organique, ici 2,5 p. 100. S'il s'agissait d'un sol plus lourd, par exemple 25 p. 100 d'argile, le taux de matière organique suffisant serait théoriquement de 1 p. 100. On a pu constater effectivement (HEBERT, 1957) des « limons rouges » en parfait état cultural malgré un taux de matière organique de 1,2 p. 100.

*d) L'efficacité d'une façon culturale est en relation avec la « consistance » du sol au moment de l'exécution.*

Il est possible dès lors de définir pour chaque type d'intervention, une gamme de consistance optimale exprimée par exemple en cohésion calculée (BJERRUM, 1951).

La recherche de cet optimum peut être réalisée en fonction du but choisi. Par exemple, un hersage peut se caractériser par la cohésion calculée au moment de l'exécution et l'indice d'aspérité (KUIPERS, 1957), obtenu après le travail. Nous avons obtenu, lors d'un essai de labours sur une séquence de sols assez hydromorphes, les résultats suivants (fig. 6) :

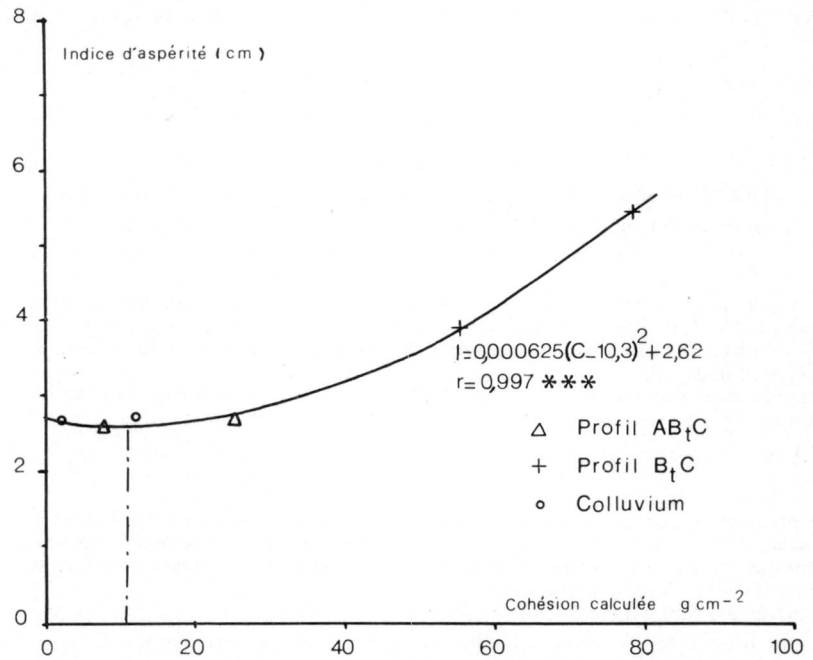



FIG. 6. — *Influence de la cohésion sur le résultat d'un hersage*

Le très bon ajustement de la courbe provient sans doute du fait que l'opération a été réalisée le même jour par le même instrument sur une séquence de sol dans un même champ. Cependant, le hersage a été réalisé à la fois sur un labour d'hiver et un labour de printemps et sur des textures différentes.

Ce résultat montre qu'il est possible de caractériser un travail du sol d'une manière relativement indépendante du type de sol. Chaque type d'outil pourrait présenter ainsi un « diagramme de rendement » en fonction de la cohésion. Cette propriété ne serait bien sûr valable que sur un sol cohérent et pour un outil mettant en jeu la cohésion comme paramètre principal. Les matériaux non cohérents comme les sols sableux obéissent vraisemblablement à d'autres lois.

Les limites d'Atterberg permettent donc bien souvent en l'absence de données précises d'aborder les problèmes de travail du sol avec objectivité. En matière d'expérimentation sur le travail du sol, il conviendrait notamment de connaître au moins la limite de liquidité et l'humidité à chaque intervention testée pour expliquer les différences de rendement obtenues que l'on attribue plus volontiers à l' « année ».

*Reçu pour publication en janvier 1971.*

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce travail, en particulier MM. HÉBERT, directeur de la Station agronomique de l'Aisne, pour ses conseils judicieux, JAMAGNE, chef du Service de Cartographie des Sols de l'Aisne qui a bien voulu mettre à notre disposition les résultats de prospection et d'analyses nécessaires à orienter la sélection des échantillons, DUNGLAS, chef de la Section Mécanique des Sols du C. R. E. G. R. et DAGNELIE, professeur à la Chaire de Biométrie de la Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux.

## SUMMARY

### THE INFLUENCE OF PHYSICAL COMPOSITION ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SOILS ; THE SIGNIFICANCE OF ATTERBERG LIMITS WITH RESPECT TO SOIL CULTIVATION

The mechanical behavior of a given soil as a function of humidity may be characterized briefly and wholly by its Atterberg limits. The variation in these limits as a function of soil texture was studied in a large sampling of diverse origin, by determining the multiple regression equations for each type of material.

It appears that the influence of a given grain-size fraction is in inverse ratio to its presence in the sample. This is represented by an equation of the following type :

$$IP = 50 \log \frac{A\ p.\ 100}{10} - 10 \log \frac{MO\ p.\ 100}{1.5}.$$

The presence of clay obviously has a leading influence. Opposed to this is the influence of silt and sand, which is generally weaker. In the absence of clay, organic matter generally acts as a compensating replacement element, with a specific action 7 to 8 times stronger, and with a moderating effect on the plastic properties of very heavy materials.

The Atterberg limits have the following uses :

— with respect to structural stability, they enable the determination of the minimum organic maintenance ration,

— with respect to soil cultivation, they enable one to go beyond a simple classification of soils by ease of cultivation, to a precise determination of the tools to be used in a given set of conditions.

## ZUSAMMENFASSUNG

### EINFLUSS DER PHYSIKALISCHEN BESCHAFFENHEIT DER BÖDEN AUF IHR MECHANISCHES VERHALTEN ; BEDEUTUNG DER ATTERBERG-GRENZEN HINSICHTLICH DER BODENBEARBEITUNG

Das mechanische Verhalten eines Bodens in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit kann zusammenfassend durch seine Atterberg-Grenzen charakterisiert werden. Seine Veränderung in Abhängigkeit zur Textur wurde an Hand zahlreicher Probestücke verschiedener Herkunft und durhc Aufstellung der vielfachen Regressionsgleichungen je nach dem Materialientyp untersucht.

So stellte man fest, dass der Einfluss einer granulometrischen Klasse um so grösser ist als sie schwach vertreten ist. Dies kann durch eine Gleichung vom Typ

$$IP = 50 \log \frac{A \text{ p. } 100}{10} - 10 \log \frac{MO \text{ p. } 100}{1,5}$$

ausgedrückt werden.

Selbstverstandlich ist der Einfluss des Tones entscheidend. Lehm und Sand wirken schwacher und im allgemeinen in entgegengesetzter Richtung. Fehlt es an Ton, dann tritt das organische Material als ausgleichender Grundstoff auf mit einer spezifisch 7 bis 8 Mal tsarkeren Wirkung, während der plastische Charakter der zu schweren Stoffe vermindert wird.

Die Atterberg-Grenzen können benutzt werden :

— hinsichtlich der Stabilität der Strukturen : die Bestimmung der minimalen organischen Unterhaltung wird möglich,

— hinsichtlich der Bodenbearbeitung : eine einfache klassifizierung der Böden nach Geschmeidigkeit ihrer Nutzung kann überschritten werden bis zu einer Vorausbestimmung der Wirkung eines Werkzeuges bei bestimmten Bodenbedingungen.

## РЕЗЮМЕ

*Влияние физического состава почв на их механическое поведение; значение границ Аттерберга при обработке почвы.*

Ж. К. РЕМИ при техническом сотрудничестве Ж. П. СЕББ.

В зависимости от степени ее влажности механическое поведение почвы может быть вкратце и вобщем охарактеризованно границами Аттерберга. Изменение этих границ в зависимости от текстуры почвы изучалось на крупном количестве образцов разного происхождения при помощи рассчета формул многократных регрессий по типу данного материала.

Выяснено было что влияние гранулометрического класса тем более сильно, чем более слабо класс этот представлен в почве. Здесь применяется формула типа :

$$ЭР = 50 \log. \frac{A\ \%}{10} - 10 \log. \frac{MO\ \%}{1,5}$$

Влияние глины, конечно главенствующее. Действие суглинков и песков более слабое и обычно противоположное. Органическое вещество

чаще всего играет роль элемента — компенсатора, заменяя глину, когда этой последней нет, со специфическим в 7 или 8 раз более сильным действием, и умеряя пластичность слишком тяжелых материалов.

Границы Аттерберга могут применяться :

— при изучении прочности структуры : они дают возможность определения поддержания органического минимума.

— при изучении обработки почвы : становится возможным превзойти простую классификацию почв по их поддатливости обработкам, и предвидеть действие определенного орудия обработки в данных условиях.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BJERRUM L., 1951. Fondamental considerations on the shear strength of soils. *Geotech.*, **2**, 3.

CAMEZ Th, 1962. *Étude sur l'évolution des minéraux argileux dans les régions tempérées.* Thèse Fac. Sc. Strasbourg, 90 p.

CANARACHE A., 1965. Les facteurs de la résistance mécanique des sols et les méthodes utilisées pour les étudier. *Science du Sol*, 1965, **2**, 89-107.

CAQUOT A., KERISEL J., 1956. *Traité de mécanique des sols* (558 p.), Gauthier-Villars, Paris

COMBEAU A., 1964. Remarques sur les facteurs de variation des limites d'Atterberg. *Cah. O. R. S. T. O. M.*, II, **4**, 3-39.

DAGNELIE P., 1969. *Théorie et méthodes statistiques.* Duculot S. A., Gembloux.

DEMOLON A., HÉNIN S., 1937. In *Dynamique du sol* (p. 195), 5e édition, 1952, Dunod, Paris.

FÉODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol. Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **6**, 651-659.

GÉRARD C. J., 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, **29**, 6, 641-644.

GRAS R., 1961. Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pommier dans la Sarthe. *Ann. agron.*, **12**, 2, 207-248.

HÉBERT J., 1957. Le problème de l'humus dans les régions de culture industrielle du Nord de la France. *C. R. Acad. Agri. Fr.*, **47**, 427-431.

HÉBERT J., RÉMY J.-C., 1966. Influence du sodium et du potassium sur la stabilité structurale d'un limon bien pourvu en calcium. *Bull. AFES*, **7**, 176-183.

HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 1958, **1**, 71-90.

JAMAGNE M. *et al.*, 1967. Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. agron.* nº hors-série, vol. 18, 143 p.

KUIPERS H., 1957. A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agri. Sci.*, 255-262.

KYVELLOS G., 1956. Étude de la courbe intrinsèque des sols compactés et non saturés (condensé de thèse ingénieur-docteur soutenue à la Faculté des Sciences de Paris). *Ann. I. T. B. T. P.*, mai 1956, série 22, 385-411.

MAERTENS C., 1964. La résistance mécanique à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. agron.*, **15**, 5, 539-554.

NORMAN L. E. J., 1959. The one point method of determining the value of the liquid limit of a soil. *Geotech.*, **9**, 1.

PELTIER R., 1954. *Manuel du Laboratoire routier.* Dunod, Paris, 274 p.

PÉRIGAUD S., 1964. Travail du sol et Limites d'Atteberg. *C. R. Acad. Agri. Fr.*, **50**, 1, 57-68.

RICHARD L. A., 1953. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 321-323.

WILLIAM R. G., REAVES C. A., 1957. Relationships of Atterberg limits and cation exchange capacity to some physical properties of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 5, 491-494.

WILLIAM R. G., 1959. The effects of drying on the mechanical strength of Lloyd Clay. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 4, 255-257.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (3), 291-307.

# IRRÉGULARITÉS DE SEMIS ET COMPOSANTES DU RENDEMENT DE LA BETTERAVE SUCRIÈRE

## Essai de Méthodologie

A. FLEURY

avec la collaboration technique de Hélène Petit

*Chaire d'Agriculture de l'Institut national agronomique, 16, rue Claude-Bernard - Paris 5e*

---

## RÉSUMÉ

Le semis en place de betteraves, non suivi de démariage, définit des conditions particulières de position d'une betterave. On en a étudié l'influence sur le poids d'une racine, en tenant compte de la distance et du poids des voisines.

---

## INTRODUCTION

L'objectif d'un producteur de betterave est de récolter un tonnage important de racines à bonne teneur en sucre, et de dimension suffisante pour réduire l'importance de la tare. *A priori*, le poids T de sucre produit par unité de surface doit pouvoir s'exprimer par la formule :

$$T = N/S \times \bar{P} \times t$$

où N/S représente le nombre N de plantes sur la surface S, soit la densité de peuplement, $\bar{P}$ le poids moyen d'une racine, et $t$ la teneur en sucre.

La teneur en sucre est peu maîtrisable par l'agriculteur, dépendant probablement, pour une même potentiabilité génétique, d'interactions entre peuplement et climat ; par contre, l'agriculteur a des moyens d'action sur les deux premiers termes.

La densité de peuplement dépend de la densité de semis, modifiée par la faculté germinative du lot de graines et la qualité de la levée. De ce point de vue, il faut distinguer :

— d'une part, le semis traditionnel de graines polygermes. Dans ce cas, les incidents de fonctionnement du semoir, qui s'ajoutent aux irrégularités de levée et à l'hétérogénéité génétique, peuvent être rectifiés dans une certaine mesure par le démariage ;

— d'autre part, le semis en place de graines monogermes. Il permet de réaliser d'emblée le peuplement désiré, pourvu que soient obtenues pour la variété utilisée, en fonction de la faculté germinative, une excellente levée et une mise en place précise.

Ces dernières conditions sont inégalement remplies ; aussi le semis en place est-il souvent responsable de peuplements plus hétérogènes que ceux obtenus par la méthode traditionnelle de semis associée au démariage.

Le second terme, le poids moyen d'une racine, semble être déterminé par deux groupes de facteurs. D'abord, la potentialité génétique, puisqu'une variété de betterave est en fait une population, le poids réalisé par une plante peut varier en fonction de différences d'aptitudes à exploiter le milieu. Ensuite, l'effet de l'environnement ; il inclut :

— d'une part l'espace disponible pour la croissance ; plus il est étendu, plus la plante peut s'épanouir, jusqu'à réaliser sa production maximum.

— d'autre part, l'hétérogénéité du milieu, qui agit au niveau du sol, du microclimat, de la présence d'adventices... Dans une certaine mesure, on peut admettre que cette variabilité est indépendante du paramètre précédent.

Nous nous sommes proposés d'évaluer, à partir d'une enquête, les conséquences des irrégularités d'un semis en place, sur le poids des betteraves ; cette étude nous conduira à étudier les interactions entre les facteurs du peuplement, et le poids des racines.

## I. — ORIGINE ET VALIDITÉ DES DONNÉES

### A. — *Origine des données*

Nous avons travaillé chez M. Jean-Pierre Clot, agriculteur à Villegagnon (77), sur une parcelle de betteraves *Kleinwanzleben Monobeta*. Le semis a été fait fin avril 1969, avec un semoir Delfosse à six rangs, dans de bonnes conditions météorologiques. Divers traitements insecticides et désherbants ont été faits (Heptachlore, Diptérex et Métasystémox, Avadex, Pyramine) et deux irrigations ont eu lieu en juin (30 mm) et août (30 mm).

Nous avons choisi une zone qui présentait un bon état sanitaire d'ensemble, était à peu près homogène, tant par l'aspect des plantes, que par le nombre de manques. Sur 16 lignes contigües et 12 mètres de long, nous avons mesuré l'espacement entre chaque plante, puis arraché, effeuillé et décolleté chaque betterave pour en peser la racine.

### B. — *Validité des données*

Quand les plantes sont très jeunes, la mesure de l'espacement se fait pratiquement sans erreur expérimentale importante. Mais nous avons opéré à maturité en

mesurant l'espacement d'axe de racine en axe de racine ; aussi nos mesures sont-elles entachées d'erreurs provenant de la difficulté de localiser l'axe. En effet, la dissymétrie de la racine et son orientation constituent autant de causes d'imprécision. L'erreur globale absolue doit être de l'ordre de 5 cm ; l'espacement voulu étant de 14,5 cm, et l'espacement moyen réalisé de 24,7 cm, ce n'est que sur des espacements petits que l'on a une importante erreur relative.

La pesée est faite à la balance à cadran, avec une précision de l'ordre du gramme. Le décolletage et le nettoyage des racines introduisent une erreur expérimentale qui a peu de conséquences sur le classement d'ensemble des racines.

C'est par l'analyse de ces données que nous allons essayer de répondre aux questions posées au début de cette note.

## II. — ÉTUDE DES CARACTÈRES INDIVIDUELS

Chaque plante de rang $n$ est caractérisée par trois paramètres : le poids $P_n$ de sa racine et les valeurs $e_{n-1,\ n}$ et $e_{n,\ n+1}$ des espacements le séparant de la plante précédente, de rang $n - 1$, et de la suivante, de rang $n + 1$. Dans cette partie, nous allons étudier séparément ces paramètres.

### A. — *Espacement entre betteraves*

1. *Étude de leur répartition.*

La figure 1 représente l'histogramme de répartition de l'espacement, mesuré en centimètres. Cette distribution, déjà signalée (I. T. B., 1965 ; NEEB et WINNER, 1968) a l'allure d'une courbe périodique amortie ; on peut en décomposer l'analyse en l'étude de la dispersion autour d'une fréquence maximum, d'une part, et d'autre part, celle de la répartition des espacements pour chaque période.

Appelons $e$ l'espacement de référence pour lequel est réglé le semoir ; dans le cas présent, $e = 14{,}5$ cm. On constate que les maxima observés ont une période égale à $e$, et une abscisse égale à $Ke$, K étant un nombre entier positif, qui donne une mesure de l'espacement en valeur $e$. Autour de ce maximum $Ke$, l'ensemble des espacements compris dans l'intervalle $(K - 1/2)e$, $(K + 1/2)e$ constitue la classe K d'espacements. L'effectif $N_K$ de cette classe K est donné par la relation :

$$N_K = N \times p(1 - p)^{K-1}$$

où N représente l'effectif total et $p$ la probabilité de présence d'une betterave à l'emplacement théorique, soit, ici, tous les 14,5 cm. Cette probabilité de présence intègre des données propres à la situation au champ (régularité de semis et de levée) et les erreurs liées aux mesures. L'ajustement graphique donne $p = 0{,}52$. Le tableau 1 permet de comparer les valeurs calculées et les valeurs observées ; on constate que l'accord est satisfaisant. Nous pouvons donc utiliser les valeurs observées dans la suite de notre analyse, puisque nous connaissons leur loi de répartition.

Pour simplifier les calculs ultérieurs, nous avons rapporté à la valeur médiane $Ke$ d'une classe la valeur de tous les espacements de cette classe. Cela revient à admettre que tout espacement compris entre $(K - 1/2)e$ et $(K + 1/2)e$ aurait eu la valeur $Ke$,

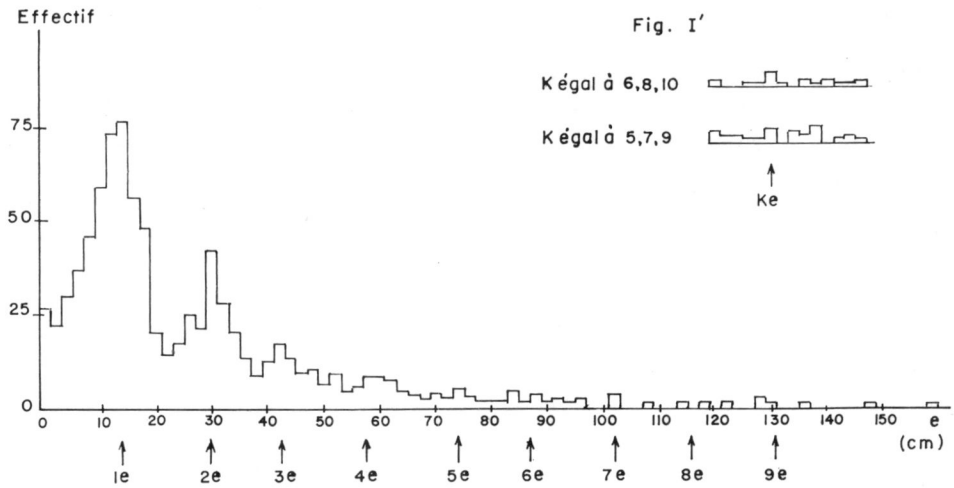



FIG. 1. — *Histogramme des espacements entre betteraves*
FIG. 1'. — *Effectifs cumulés pour les valeurs élevées de K*
*e* représente le réglage du semoir ; ici, $e = 14{,}5$ cm, les classes ont une amplitude de 2 cm

TABLEAU I

*Effectifs calculés et observés par classe d'espacement*

| K | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Effectif : | | | | | | | |
| Observé ..... | 379 | 172 | 83 | 45 | 18 | 13 | 6 |
| Calculé ..... | 348 | 167 | 80 | 39 | 18 | 9 | 4 |

$N_p = 842$, car 18 lignes, soit deux supplémentaires, ont été relevées.

TABLEAU 2

*Valeurs conventionnelles des espacements*

| Mesure de *e* (cm) | Valeur simplifiée (cm) | Valeur conventionnelle (en unité « *e* ») |
|---|---|---|
| $0 < e \leqslant 7{,}25$ | $0 \times 14{,}50 = 14{,}50$ | 0 |
| $7{,}25 < e \leqslant 21{,}75$ | $1 \times 14{,}50 = 14{,}50$ | 1 |
| $21{,}75 < e \leqslant 36{,}25$ | $2 \times 14{,}50 = 29{,}00$ | 2 |
| $36{,}25 < e \leqslant 50{,}75$ | $3 \times 14{,}50 = 43{,}50$ | 3 |
| $50{,}75 < e \leqslant 65{,}25$ | $4 \times 14{,}50 = 58{,}00$ | 4 |
| $65{,}25 < e \leqslant 79{,}75$ | $5 \times 14{,}50 = 72{,}50$ | 5 |
| $79{,}75 < e \leqslant 94{,}25$ | $6 \times 14{,}50 = 87{,}00$ | 6 |
| $94{,}25 < e \leqslant 108{,}75$ | $7 \times 14{,}50 = 101{,}50$ | 7 |

s'il n'avait été mal réalisé (fonctionnement du semoir...). Ceci est exact pour un semis bien réalisé, mais ne constitue qu'une approximation dans le cas présent. En d'autres termes, la position des racines sur le terrain dépend d'un certain nombre de facteurs ; des individus placés apparemment dans la classe K peuvent appartenir en réalité à la classe K — 1 ou K + 1. Nous nous autoriserons de la régularité observée (fig. 1) et de la faible valeur des fréquences des espacements bornant l'intervalle $(K - 1/2)e$, $(K + 1/2)e$ pour assimiler ces cas particuliers à la classe K. En tout état de cause, les effets observés sont plus liés à la position effectivement réalisée, qu'à celle qui aurait dû l'être par l'action du semoir.

Le tableau 2 résume les valeurs qui vont nous servir de mesure de l'espacement. Il faut remarquer que pour K = 0, il n'y a qu'une demi-classe d'espacements d'intervalle 0, $e/2$ en réalité, et non pas une classe d'intervalle — $e/2$, $e/2$, il en résulte que la valeur médiane réelle est $e/4$, et non la valeur théorique 0. Nous utiliserons cette singularité dans la discussion de la figure 5.

Ainsi la position d'une plante va être caractérisée par deux valeurs particulières de K, mesurant les espacements de cette betterave à ses deux voisines ; nous pourrons y rattacher d'autres données, telles que le poids.

2. *Surface disponible de la plante.*

Nous appelons surface disponible $S_n$ de la plante de rang $n$ le rectangle délimité par deux droites parallèles à la direction de semis, situées de part et d'autres de la ligne de la plante de rang $n$, à une distance $r/2$, $r$ étant la valeur de l'écartement des lignes de semis, et par les médiatrices des espacements $e_{n-1,\ n}$ et $e_{n,\ n+1}$ (fig. 2). On peut constater que tout point de cette surface est plus près de la plante de rang $n$ que de tout autre. Dans un semis parfaitement régulier, la plante de rang $n$ est au centre de ce rectangle ; les espacements $e_{n-1,\ n}$ *et* $e_{n,\ n+1}$ sont égaux.

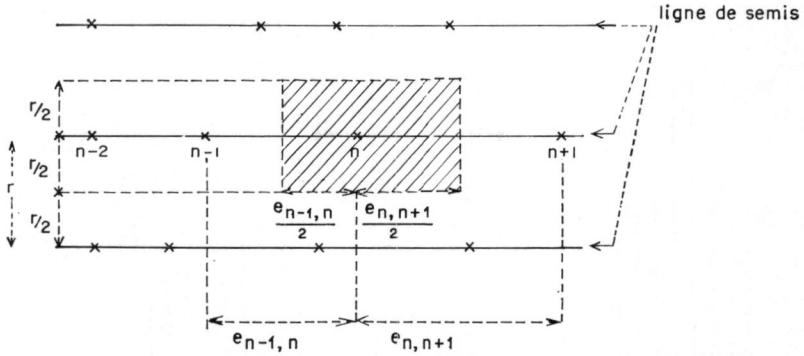



FIG. 2. — *Schéma de la surface disponible $S_n$ de la betterave n*
(La surface $S_n$ est hachurée)

L'aire de $S_n$ est donc calculée comme produit des côtés :

$$S_n = r \times 1/2(e_{n-1,\ n} + e_{n,\ n+1})$$

Puisque $r$ est constant, il s'ensuit que $S_n$ est également définie par le second terme du produit. En définitive, les espacements étant mesurés par les valeurs de K, $S_n$ prendra toutes les valeurs possibles de la demi-somme de deux nombres K quel-

conques, soit : 0 ; 0,5 ; 1,0 ; 1,5 ; ...). Dans ce système de mesure, la surface unité est égale au produit de l'espacement unité (14,5 cm) par l'interligne (45 cm), soit 652,5 cm².

$S_n$ peut être considérée de deux façons :

— soit par sa valeur calculée seulement ;

— soit en tenant compte de la dissymétrie possible, en mentionnant la valeur des espacements : par exemple, les surfaces $S_n = 2$ peuvent appartenir à trois groupes de même aire définis par des valeurs différentes des espacements : (4,0) (3,1) (2,2).

Nous utiliserons par la suite ces deux représentations ; il est évident que si la seconde, moins souple, donne des résultats différents, cela signifiera que, quel que soit l'effet de la surface totale disponible, il faut considérer aussi l'effet de voisinage, ce que traduit la prise en compte des deux espacements.

La figure 3 indique l'histogramme des surfaces disponibles, et la fraction de la surface totale qu'occupe chaque classe. On peut constater que les deux courbes sont dissymétriques, et que le maximum de la courbe de répartition de la surface occupée couvre les classes 1 à 2,5. Or, l'objectif au semis est de réaliser $S_n = 1$, avec des espacements égaux à l'unité de réglage du semoir ; on peut constater que cette situation n'apparaît que dans 27 p. 100 des cas, qui occupent 16 p. 100 de la surface totale observée.

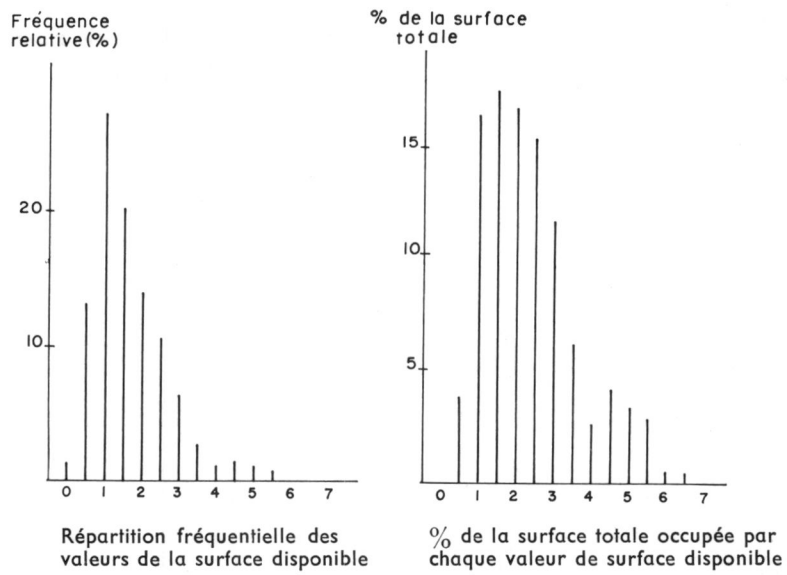



FIG. 3. — *Répartition de la surface disponible*

Dans un premier temps nous utiliserons, à cause de sa simplicité, la représentation où chaque betterave n'est affectée que d'une valeur exprimant sa position.

### B. — *Poids de la racine*

Chaque racine a été pesée ; pour la commodité de l'analyse nous n'utiliserons que des classes de poids égales à 100 grammes, et qualifiées par le chiffre des hectogrammes. Par exemple, la classe 4 regroupe toutes les betteraves de poids compris entre 400 et 499 grammes. Nous avons admis que le poids moyen $\overline{P}$ d'une classe est égal à la médiane : pour la classe K, $\overline{P}_k = 100\,K + 50$ ; pour $K = 4$, $\overline{P}_4 = 450$ g.

La figure 4 A indique la répartition fréquentielle des poids ; elle présente une allure hyperbolique où les betteraves de plus petite taille sont les plus fréquentes. Celles de la classe 0 représentent 19 p. 100 de l'effectif total, et la moitié des racines pèsent moins de 500 grammes : le poids moyen se situe cependant à 720 grammes.

La figure 4 B représente la contribution de chaque classe au rendement total ; cette courbe, d'allure très différente, possède un maximum très net pour la classe 12 ($\overline{P}_{12} = 1\,250$ grammes). Cette répartition, bien connue, souligne que ce sont les betteraves moyennes qui font le rendement ; mais l'importance numérique des plus petites n'apparaissant pas habituellement, la connaissance de l'expression des potentialités de la variété est tronquée.

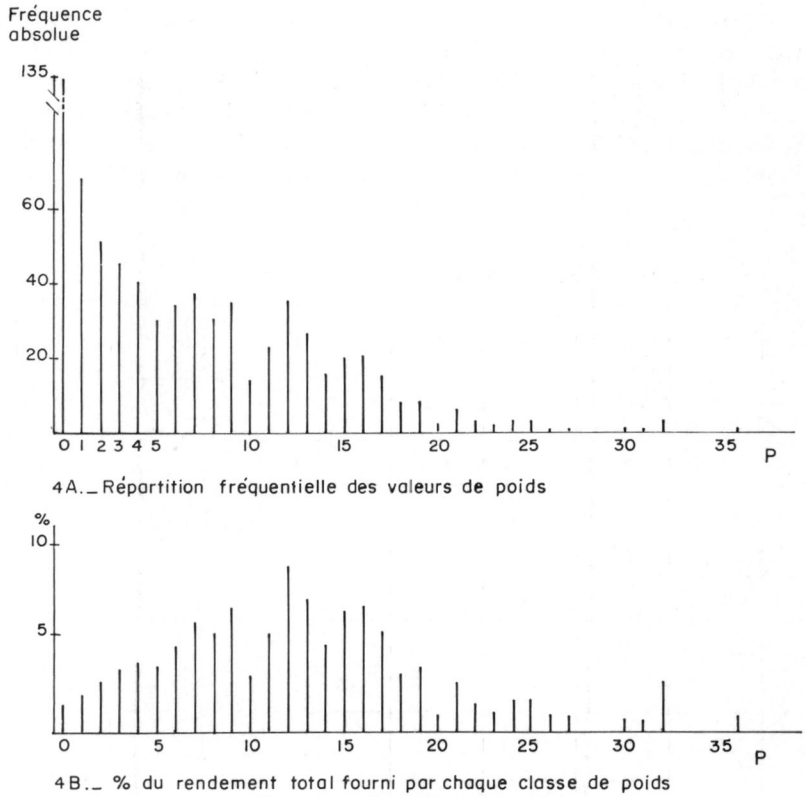



FIG. 4. — *Répartition des poids*

Chaque plante est maintenant caractérisée par deux valeurs : sa surface disponible $S_n$ et son poids $P_n$ ; nous allons rechercher quelles liaisons apparaissent entre ces deux groupes de données, dont les distributions sont très différentes (fig. 3 et 4).

TABLEAU 3

*Caractéristiques de la population d'une classe de surface*

| Classe de Surface | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3* | 3,5 | 3,5* | > 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poids moyen d'une racine | 220 | 396 | 583 | 748 | 867 | 1083 | 884 | 989 | 797 | 1072 | 1210 |
| Effectif | 10 | 94 | 196 | 144 | 100 | 74 | 46 | 28 | 21 | 9 | 33 |

## III. — RELATIONS ENTRE LES CARACTÈRES OBSERVÉS

### A. — *Poids et surface disponible*

1. *Poids moyen par classe de surface.*

Le tableau 3 montre que le poids moyen des betteraves de chaque classe augmente rapidement avec la surface disponible, surtout aux valeurs faibles de celle-ci ; la courbe de la figure 5 le souligne. Comme les effectifs des classes extrêmes sont parfois très faibles, nous avons voulu vérifier le caractère significatif de cette relation. Aussi avons-nous testé les différences de poids observées entre chaque couple de classes (tabl. 4). Cette manière permet d'éliminer les objections qui pourraient être

TABLEAU 4

*Comparaison du poids moyen de deux classes*

| | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3 * | 3,5 | 3,5 * |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ≠ | | | | | | | | |
| 1,5 | ≠ | ≠ | | | | | | | |
| 2 | ≠ | ≠ | = | | | | | | |
| 2,5 | ≠ | ≠ | ≠ | ≠ | | | | | |
| 3 | ≠ | ≠ | = | = | ≠ | | | | |
| 3 * | ≠ | ≠ | = | = | = | = | | | |
| 3,5 | ≠ | ≠ | = | = | ≠ | = | = | | |
| 3,5 * | ≠ | ≠ | ≠ | ≠ | = | ≠ | = | ≠ | |
| 4 | ≠ | ≠ | ≠ | ≠ | = | ≠ | ≠ | ≠ | = |

= La différence est significative au seuil de probabilité 5 p. 100.
≠ La différence n'est pas significative à ce seuil.

opposées à la validité du calcul d'un coefficient de corrélation. Les poids moyens des classes de surface 3 et 3,5 paraissent aberrants. Il s'agit d'échantillons de faible effectif, dans lesquels le hasard a conduit à une exagération de la fréquence des situations dissymétriques (dans respectivement 40 p. 100 et 60 p. 100 des cas), alors qu'ils ne figurent que pour 12 p. 100 des cas des surfaces disponibles égales à 4. En éliminant les plantes situées en position très dissymétrique, on constate une augmentation sensible du poids moyen, qui prend alors une place acceptable dans l'ensemble des résultats. Ces nouvelles valeurs sont affectées d'un astérisque (tabl. 3 et 4, fig. 5).

La courbe de répartition des poids s'ajuste de manière très satisfaisante (fig. 5) à une hyperbole équilatère d'équation :

$$P = \frac{s}{0{,}53s + 1{,}19} \qquad (1)$$

P poids d'une betterave en kg, $s$ surface disponible.

Cette relation a la forme de celle proposée par SHINOZAKI et KIRA (1955) :

$$\bar{p} = Ad + B \qquad (2)$$

$p$ est le poids d'une plante,
$d$ la densité de peuplement,
A et B des constantes ayant une valeur biologique.

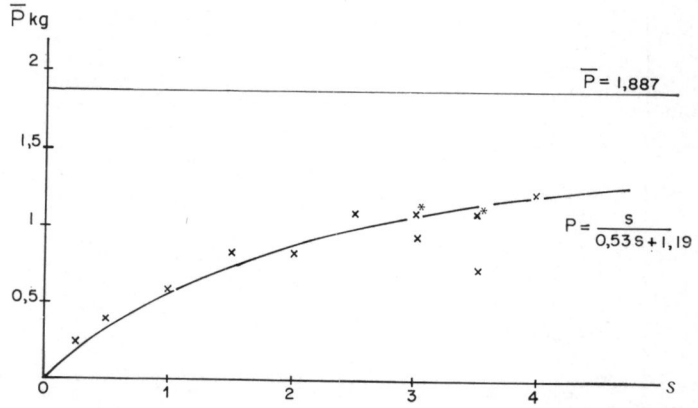



FIG. 5. — *Poids moyen d'une betterave en fonction de la surface disponible*
La valeur de $\bar{P}$ correspondant à $s = 0{,}25$ est la valeur moyenne du poids des betteraves situées à moins de 7,25 cm de leurs deux voisines. Les valeurs * correspondent aux valeurs rectifiées

En effet, la densité $d$ est le rapport du nombre de plantes à la surface considérée qu'elles occupent, rapport que l'on peut symboliser : $d = N/S$. Or, l'inverse de ce rapport S/N représente la surface disponible moyenne par plante, soit $s = 1/d$. De l'équation (2), il vient : $1/\bar{p} = A/s + B$, soit

$$P = \frac{s}{A + Bs} \qquad (3)$$

Dans notre cas et avec notre système d'unités de surface, les valeurs de A et B sont respectivement :

$$A = 1{,}19 \text{ et } B = 0{,}53$$

Il est clair en effet, si l'on considère les unités utilisées pour que l'équation (3) soit homogène, que la valeur de A dépend de l'unité de surface utilisée : si c'est le mètre carré, A = 0,078.

*Sens des coefficients A et B.*

Si la densité de peuplement diminue, S augmente ; la valeur limite de P est alors 1/B. Cette valeur représente donc le poids moyen maximum de racines de betterave poussant hors concurrence, pour une variété donnée dans un milieu donné. Dans le cas présent, ce poids est de 1,9 kilogramme. Si la densité de peuplement devient très grande, *s* devient très petit, et la valeur limite de P est 0 ; le rendement par unité de surface, $P/s = 1/(A + Bs)$, admet alors pour limite 1/A. 1/A exprime donc le rendement maximum par unité de surface ; dans nos conditions, ce rendement est de 12,8 kg par mètre carré, soit 128 t/ha. Cette donnée représente la productivité du système (plante × milieu), et indique ce que peut être le rendement, en dehors de contraintes extérieures (en l'occurrence, les critères technologiques de taille des racines). Ainsi, on peut supposer que les potentialités du système (plante × milieu) sont sous-exploitées dans ces conditions puisque les bons rendements se situent

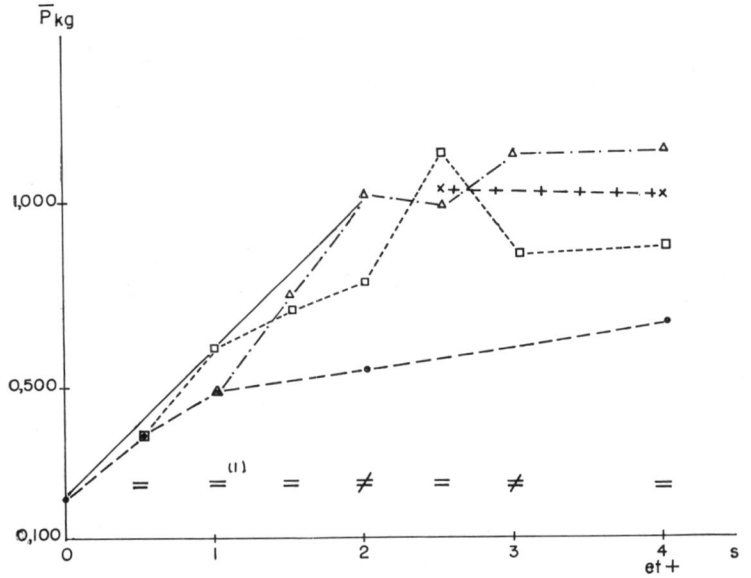



FIG. 6. — *Poids moyen des betteraves pour une classe de valeur disponible ; influence de la dissymétrie*

•— — —• un espacement est égal à 0 ; l'autre varie de 0 à 4
□------□ — — 1 ; — 0 à 5
Δ—·—·Δ — — 2 ; — 0 à 4
×+—+—× — — 3 ; — 1 à 2
} il y a cumul des espacements plus grands

——— Courbe des surfaces symétriques

= Les valeurs de $\overline{P}$ pour cette abscisse ne diffèrent pas au seuil 5 p. 100
≠ Les valeurs de $\overline{P}$ pour cette abcisse diffèrent au seuil 5 p. 100
= (1) Différence au seuil 8 p. 100

vers 60 tonnes de racines par hectare. De toute manière, les valeurs observées que nous indiquons sont dépendantes de la valeur imposée à l'écartement des lignes ; aussi sont-elles seulement indicatives.

Nous avons constaté, en comparant l'évolution du poids moyen dans une classe de surface à l'évolution des classes de surfaces, qu'il existe des cas anormaux que l'on peut rectifier en éliminant les betteraves occupant une position très dissymétrique dans leur surface disponible. Nous allons donc examiner systématiquement l'influence de la position de la plante dans sa surface, pour mettre en évidence des effets de la concurrence.

2. *Influence de la dissymétrie des espacements.*

La figure 6 fait apparaître une relation entre le poids moyen d'une betterave et la valeur de classes de surface disponible définies en tenant compte de la valeur des espacements composant cette surface : chaque courbe montre la variation du poids moyen quand, un espacement étant donné (égal à 0, 1, 2 ou 3), l'autre croît à partir de 0. La signification des différences a été testée au seuil 5 p. 100. Il apparaît que la différence, lorsqu'elle existe, est toujours en faveur de la position la plus proche de la symétrie :

pour $S = 2$, $\overline{P}\ (2,2) > \overline{P}\ (3,1) > \overline{P}\ (4,0)$,

pour $S = 3$, $\overline{P}\ (4,2) > \overline{P}\ (5,1)$,

pour $S = 1$, $\overline{P}\ (1,1) > \overline{P}\ (2,0)$ au seuil de signification 8 p. 100.

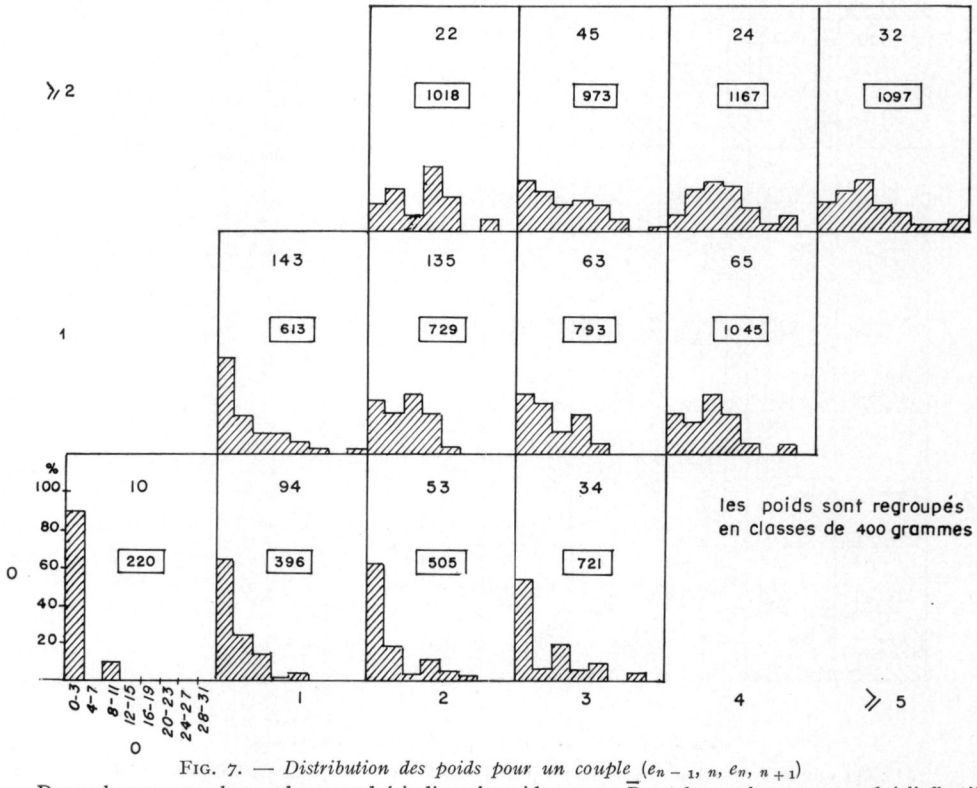



FIG. 7. — *Distribution des poids pour un couple* $(e_{n-1}, n, e_n, n+1)$

Dans chaque case, le nombre encadré indique le poids moyen $\overline{P}_n$ et le nombre non encadré l'effectif.

Il apparaît donc que la position symétrique est plus favorable qu'une position dissymétrique, la valeur de la surface étant égale ; un semis régulier conduit donc à un rendement plus élevé qu'un semis irrégulier. Avec les mêmes valeurs de surface, dans notre cas, le rendement aurait été accru de 16 p. 100 si toutes les betteraves avaient été en position symétrique.

Cependant, nos valeurs restent très dispersées, montrant qu'un autre facteur doit avoir une importance sensible ; aussi, avons-nous cherché si la réalisation de la surface a une influence sur la dispersion des poids.

3. *Étude de la dispersion des poids.*

La figure 7 a été établie en notant en abscisse la valeur de l'espacement le plus grand, en ordonnée, la valeur de l'espacement le plus petit. Dans les cases ainsi construites, nous avons représenté l'histogramme de fréquence des poids. Des regroupe-

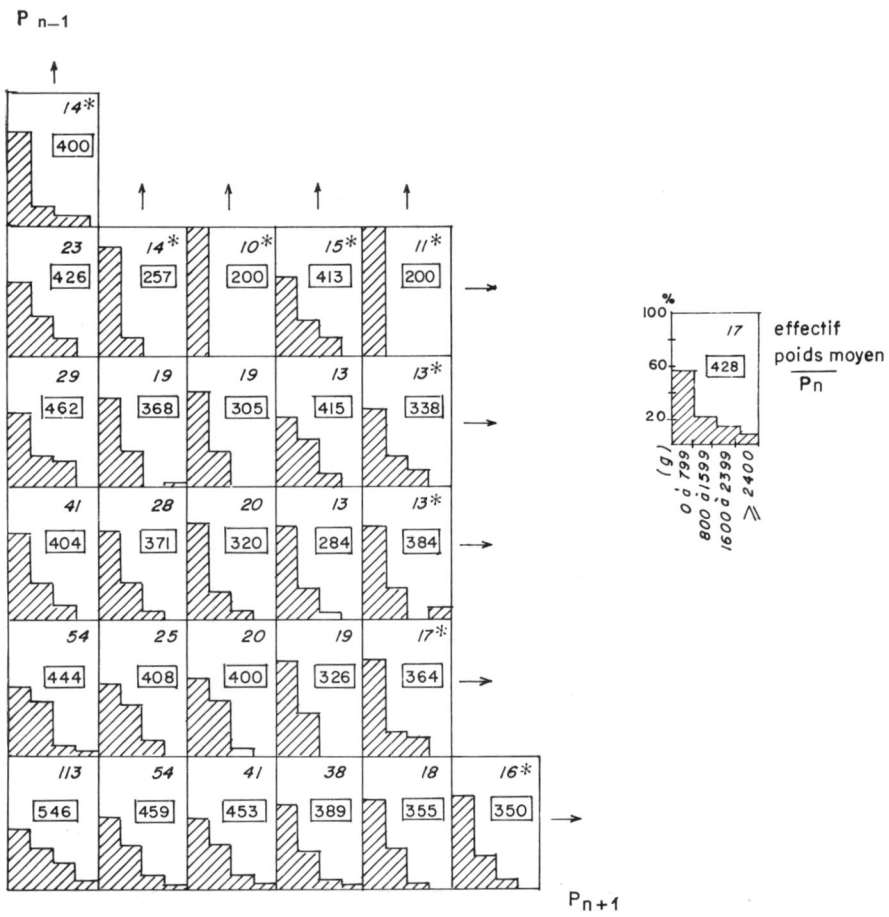



FIG. 8. — *Distribution des poids $P_n$ de la betterave n selon les poids $P_{n-1}$ et $P_{n+1}$ des betteraves voisines*

16* : Cet effectif inclut toutes les racines pour lesquelles un des poids de voisines ou les deux, sont plus élevés (sens de la flèche).

ments de classes ont été nécessaires, pour avoir des effectifs suffisants : dans les couples d'espacements, nous disposons de 12 cases, et pour les poids, nous avons pris des classes d'amplitude 400 grammes : 0 à 399 grammes, 400 à 799... On peut constater que, pour des valeurs faibles de la surface, la fréquence des petites betteraves est accrue. Au fur et à mesure de l'augmentation de la surface, que ce soit le long d'un des axes de coordonnées ou de la première bissectrice, la fréquence des petites racines décroît. Quand les deux valeurs deviennent grandes (cases 4,2 et 5,2), la distribution prend une allure plus gaussienne : ce sont les betteraves des classes 8 à 11 qui sont les plus fréquentes. Ce fait est à rapprocher de la figure 4 B où ce sont les betteraves de la classe 12 qui contribuent les plus au rendement total. Cela conduit à suggérer l'hypothèse d'une distribution normale des poids des racines en situation hors compétition.

Ainsi, nous pouvons conclure à un effet de la surface disponible sur la réalisation du poids, résultat qui corrobore ceux de GAUTHERET (1966) : une surface plus grande permet une meilleure extériorisation des possibilités des plantes. Mais, l'importance de la symétrie, à surface égale, montre l'action dépressive des plantes voisines. Nous sommes donc conduits à chercher si cette action est influencée par le poids des plantes ainsi mises en compétition.

### B. — *Étude de l'effet des voisines apprécié par leur poids*

Nous avons repris l'étude de la distribution des poids en dressant la figure 8. En abscisse et en ordonnée, sont portés respectivement les poids des racines de rang $n - 1$ et $n + 1$ ; dans chacune des cases ainsi définies, l'histogramme des fréquences des poids a été indiqué. Il a fallu regrouper les effectifs en quatre grandes classes d'amplitude égale à 800 g : 0 à 799, 800 à 1 599... L'importance de la concurrence est clairement mise en évidence : la fréquence des faibles poids augmente quand le poids de l'une ou l'autre voisine, ou de la somme des deux, augmente. Par contre, plus les racines voisines sont de faible poids, plus la distribution est étalée. Le graphique suggère aussi que les distributions sont relativement invariantes quand le poids cumulé des voisines est constant quels que soient leurs poids respectifs. Dans le même sens, le poids moyen des betteraves croît quand décroît le poids cumulé des voisines.

Ainsi, il existe une relation entre le poids d'une betterave et celui des voisines. Il nous faut donc maintenant relier l'effet du poids à celui de l'éloignement, et préciser les relations qui peuvent exister entre $P_n$, $S_n$, et $(P_{n-1} + P_{n+1})$.

### C. — *Existence d'une relation entre le poids d'une plante, sa surface disponible et le poids des plantes voisines*

La situation la plus fréquente apparaissant sur la figure 8 est celle qui correspond à $P_{n-1}$ et $P_{n+1}$ inférieurs ou égaux à 3 : il y a 113 plantes. On peut penser qu'il y aura réellement compétition, seulement si les plantes $n - 1$ et $n + 1$ sont suffisamment proches ce que traduira une valeur faible de $S_n$ ; mais si $S_n$ est grand, on pourra admettre, étant donné les faibles valeurs de poids des voisines, que la betterave $n$ se trouve hors compétition. C'est ce que montre le graphique 9 où les poids ont été regroupés en 6 classes d'amplitude 600 grammes, et les surfaces en trois classes : 0 et 0,5 ; 1 et 1,5 ; et les surfaces supérieures ou égales à 2. On peut constater que, pour les surfaces élevées, la distribution est pratiquement normale, avec un poids moyen à 1 490 grammes ; quand les surfaces diminuent, la courbe subit un biais

important vers les poids faibles, et le poids moyen diminue fortement : il est de 350 grammes pour la classe de surface faible.

Ainsi se trouve étayée l'hypothèse suggérée par la figure 7 : la distribution des poids de betteraves hors compétition est normale et c'est la compétition intraspécifique qui déforme vers la gauche cette distribution, telle qu'elle apparaît figure 4 A. Pour que l'on se trouve en situation de compétition faible, il faut simultanément des voisines petites, et à une distance égale au moins à 22 cm (tabl. 2) correspondant à la surface 2 symétrique. Dans les conditions de notre observation, la seule concurrence subsistant est celle des betteraves des lignes voisines (à 45 cm au moins) et celles des betteraves $n - 2$ et $n + 2$. Nous n'avons pas la possibilité ici de pondérer leur influence.

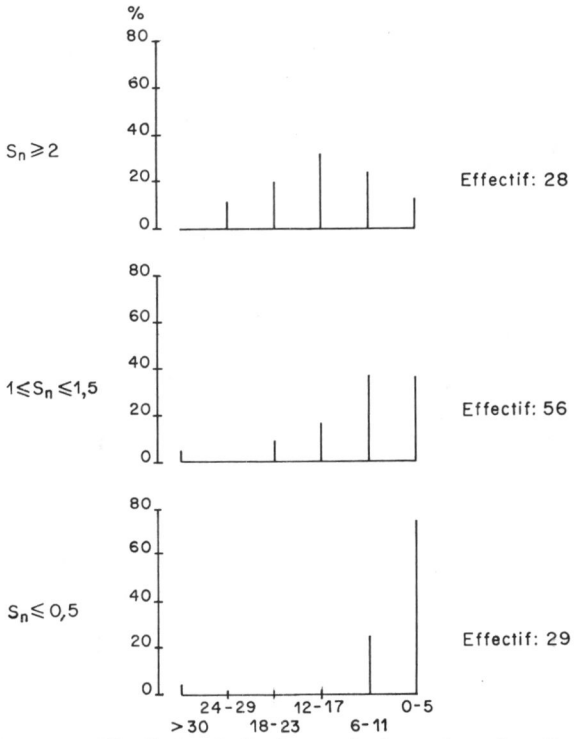



FIG. 9. — *Distribution de $P_n$ dans trois classes de surface disponible pour $P_{n-1} < 400$ g et $P_{n+1} < 400$ g*

## CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons mis en évidence l'influence de la dimension et de l'hétérogénéité des espacements entre plantes sur leur production. Le tableau 5 et la figure 10 en montrent les conséquences sur quelques critères techniques du rendement : rendement par unité de surface, fréquence des betteraves non marchandes, et poids moyen d'une betterave marchande, en fonction de la densité linéaire de peuplement.

Nous avons vu que la courbe de répartition des espacements peut être interprétée comme résultant de deux séries d'influences. D'une part, l'aspect de fonction périodique amortie est due surtout à une levée incomplète des graines semées, qui dépend de la faculté germinative (caractéristique variétale et qualité du lot de semences), des conditions de levée (ensemble climat-sol), du semoir et des conditions de son emploi (existence de doubles et de manques). D'autre part, la dispersion autour d'un multiple de l'espacement choisi dépend de l'interaction du sol (inégalités de surface) et du semoir. Il est bien connu des agriculteurs que la faiblesse du pourcentage de levée oblige à accroître la densité de semis ; cela provoque nécessairement un accroissement de la dispersion des espacements, à partir d'une diminution de l'espacement de réglage. Notre démarche montre la possibilité de séparer les deux composantes de la

TABLEAU 5

*Quelques résultats techniques*

| $s$ | Densité linéaire $d$ | Rendement en kg/m | | Betteraves non marchandes (en %) | Poids moyen d'une racine | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | observé | calculé | | sur l'ensemble | marchande |
| 0,5 | 13,7 | 5,43 | 4,76 | 35 | 396 | 625 |
| 1 | 6,9 | 4,02 | 4,00 | 28 | 583 | 830 |
| 1,5 | 4,6 | 3,44 | 3,46 | 15 | 748 | 889 |
| 2 | 3,4 | 2,74 | 3,06 | 12 | 807 | 920 |
| 2,5 | 2,8 | 3,03 | 2,74 | 5 | 1 083 * | 1 131 |
| 3 | 2,3 | 2,48 | 2,48 | 11 | 989 * | 1 082 |
| 3,5 | 2,0 | 2,17 | 2,26 | 5 | 1 072 | 1 134 |
| 4 | 1,7 | 2,06 | 2,08 | 0 | 1 210 | 1 460 |
| | Valeurs moyennes pour le lot de betteraves récoltées | | | | | |
| 1,7 | 4,0 | 2,92 | 3,32 | 19 | 719 | 886 |

N. B. : Nous n'avons pas pris la définition habituelle de la qualification « non marchande » (test de l'anneau) mais un seuil de poids arbitrairement fixé à 100 grammes. Le rendement a été calculé par la formule suivante :

$$R = \frac{1}{0{,}078\ s + 0{,}173} \text{ kg/m}$$

courbe et d'en apprécier les conséquences sur le rendement. Nous avons déjà pu chiffrer l'importance de l'irrégularité du semis.

Mais nous avons dû ramener, pour simplifier l'approche, une classe d'espacement à sa valeur médiane ; cette simplification crée une distorsion négligeable aux grands espacements, mais qu'il faut prendre en considération aux petits espacements. L'étude approfondie de ces derniers permettrait de mettre en évidence les raisons de l'existence de racines non marchandes, et peut-être d'éviter ce phénomène.

Notre second résultat concerne l'existence d'une relation entre les espacements et le rendement moyen d'une betterave :

$$P = \frac{S}{A + Bs}$$

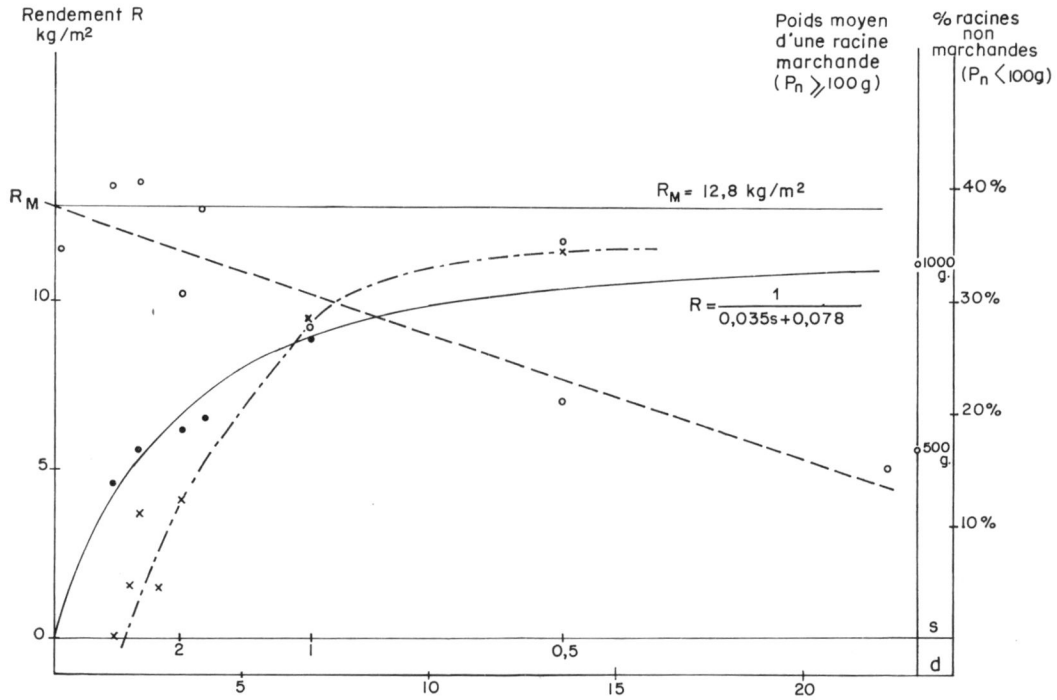



FIG. 10. — *Densité de peuplement et quelques critères technologiques*
— — — — Poids d'une racine marchande
—·—·—·— P. 100 betteraves non marchandes
———— Rendement

Les coefficients A et B prennent une signification technique intéressante, puisque 1/A représente le rendement maximum par unité de surface et 1/B le poids moyen maximum d'une betterave, dans le milieu considéré. On dispose ainsi de deux critères qui permettent de critiquer les rapports entre la variété et le milieu de culture : on pourrait, à partir de ces données, classer des variétés en fonction de certaines de leurs aptitudes, pour une région.

Enfin, les relations entre A et B sont probablement liées à la potentialité génétique de la variété et nous pouvons penser que connaître la dispersion « hors compétition » des poids de racine serait aussi une méthode de classement. L'interaction entre cette potentialité et la surface disponible définit en effet la performance des voisines et intervient donc sur la performance de la betterave centrale. Ce point devra être précisé par des études ultérieures.

Cette approche montre, une fois de plus, que l'étude détaillée de situations globales existantes constitue une méthode efficace pour répondre à certains problèmes essentiels posés par la pratique agricole.

*Reçu pour publication en janvier 1971.*

## SUMMARY

### UNEVEN SOWING AND YIELD COMPONENTS IN THE SUGAR BEET METHODOLOGY TRIAL

The sowing of sugar beets, when not followed by singling, determines the particular position of a given beet. A study was made of the manner in which this influences the weight of the root, taking account of the distance from its neighbours, and of their weights.

## ZUSAMMENFASSUNG

### UNREGELMÄSSIGKEITEN DER SAATEN UND EINFLUSS AUF DEN ERTRAG DER ZUCKERRÜBE VERSUCH EINER METHODOLOGIE

Die Saaten für Zuckerrüben an Ort und Stelle, ohne nachfolgendes Vereinzeln, bestimmt dei besonderen Bedingungen für die Stellung einer Zuckerrübe. Dabei wurde der Einfluss dieser Bedingungen auf das Gewicht einer Wurzel unter Berücksichtigung des Abstandes zu den benachbarten Zuckerrüben untersucht.

## РЕЗЮМЕ

*Неравномерности посева и их влияние на составные урожая сахарной свеклы.* Методологический опыт.

А. ФЛЕРИ.

Посев сахарной свеклы, не уравненный последующим прореживанием всходов, определяет особенности положения каждого корнеплода. Автор изучал влияние этих особенностей на вес корнеплода, с принятием во внимание расстояний отделяющих каждый из них от соседних.


## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


GAUTHERET R. J., 1966. Sur le placement des betteraves sucrières. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **18**, 74-90.

INSTITUT TECHNIQUE DE LA BETTERAVE, 1965. Les semoirs de précision. *C. R. Travaux*, 5-23.

NEEB O., WINNER C., 1968. Zur Problematik des Zuckerrübenanbaues ohne Vereinzelung. *Zucker.*, **21**(16), 445-450 et (17), 463-468.

SHINOZAKI K. et KIRA T., 1956. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-D effect. *Journ. Inst. Polytech. Osaka*, City Univ. D7, 35-72.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (3), 309-342.

# SUR LA DIFFUSIBILITÉ DES IONS-PHOSPHATE DU SOL

G. BARBIER [1], J.-C. FARDEAU et P. MARINI
avec la collaboration technique de Jocelyne JAPPE

*Service de Radioagronomie,*
*Centre d'Études Nucléaires de Cadarache*
*B. P. nº 1, 13 - Saint-Paul-lez-Durance*

## RÉSUMÉ

Ce mémoire concerne essentiellement l'autodiffusion d'ions phosphate accumulés dans le sol par des reliquats d'engrais au cours de décennies antérieures.

Un chapitre méthodologique traite notamment des erreurs d'interprétation qui résultent de l'application de la formule de dilution isotopique à des ensembles d'atomes P (sol ou sol + plante) dont la composition isotopique est loin d'être uniforme. La validité de la technique des mesures isotopiques a été confirmée par la concordance des résultats obtenus en intervertissant les marques isotopiques de deux sources de phosphore.

L'étude d'échantillons de sols prélevés sur des champs d'expériences de longue durée, a confirmé qu'une fraction importante d'ions-phosphate anciennement enterrés n'est pas actuellement isotopiquement échangeable (en un temps compatible avec la période de $^{32}P$). A la limite — au moins apparente — de la dilution isotopique, le rapport, $\Delta P_{ie}/\Delta P_t$, des accroissements de $PO_4$ isotopiquement échangeable et de $PO_4$ minéral total, ne dépasse pas 10 p. 100 dans les sols calcaires étudiés. Même dans des sols ni calcaires, ni franchement acides, le même rapport peut ne pas dépasser 50 p. 100.

Cependant, il serait prématuré d'en conclure qu'il est nécessaire d'enrichir indéfiniment le sol en P total pour maintenir à son niveau actuel l'activité chimique des ions $PO_4$. Les auteurs ont confirmé en effet que les racines de plantes ont la faculté de libérer $PO_4$ de composés solides, organiques ou minéraux, et notamment de phosphates calciques basiques. Un phosphate apatitique de Gafsa a été attaqué par des racines de ray-grass même en sol basique, mais ne l'a pas été en sol calcaire.

Le mémoire se termine par la discussion d'une expérience sur l'alimentation P de plantes en milieu hétérogène quant à la concentration en $PO_4$ diffusible.

## I. — INTRODUCTION

Un agronome qui passerait en revue les progrès de la science du sol au cours des 50 dernières années, se rendrait compte que l'agrochimie n'a commencé à s'affranchir de certains concepts conventionnels que dans les années qui ont suivi la deuxième

[1] Directeur de Recherches honoraire de l'I. N. R. A., Conseiller scientifique au Service de Radioagronomie, Centre d'Études Nucléaires de Cadarache.

guerre mondiale, et que cela coïncide avec la mise en évidence d'un fait dont l'importance peut avoir été méconnue. Voici ce fait :

L'emploi d'isotopes a permis d'établir la preuve matérielle que des petits ions fortement retenus dans le sol, qualifiés souvent de fixés, demeurent en réalité animés de mouvements de diffusion, de sorte qu'ils se distribuent continuellement entre l'eau libre et les surfaces externes et internes des particules ou agrégats du sol. Chacun de ces ions passe une petite partie de son temps dans la solution libre, et la majeure partie sur et dans les particules solides.

Des physico-chimistes avertis se doutaient bien qu'il ne pouvait pas en être autrement, mais ils n'en possédaient pas la preuve.

Nous rappellerons d'abord rapidement comment ce fait a été établi :

On mélange un peu de terre avec une solution diluée d'un sel de calcium par exemple, marqué par du $^{45}Ca$ (radioactif). On sépare ensuite la solution ; dans tous les cas, on constate deux faits :

1° La quantité totale d'ions $^{45}Ca$ de la solution a fortement diminué, ce qui prouve qu'une fraction importante du calcium de la solution est passée sur ou dans la terre.

2° Le rapport $^{45}Ca/Ca$ en solution a fortement diminué, ce qui prouve que du Ca est passé de la terre à la solution :

$$\underset{\text{en terre}}{Ca^{++}} \rightleftarrows \underset{\text{en solution}}{Ca^{++}}$$

Ce double processus se constate dans tous les cas, même si le système reste en équilibre. Il faut donc admettre que les ions Ca continuent indéfiniment à se déplacer des particules solides à la solution libre et vice versa. En d'autres termes, les isotopes permettent de matérialiser la double flèche par laquelle on représente un système qui tend vers un équilibre statistique de distribution de particules en mouvement entre deux portions d'espace, les déplacements de particules de même espèce ayant la même fréquence moyenne dans les deux sens à l'équilibre.

C'est cet artifice expérimental que l'on appelle l'échange isotopique, lequel aboutit à la dilution isotopique, c'est-à-dire à la dilution de chacun des deux ensembles d'ions de même espèce dans l'autre, autrement dit à leur mélange.

Des faits analogues ont été constatés pour de nombreux autres ions, notamment K, Na, $NH_4$, Sr, Ba, Cu, $PO_4$, etc., ainsi que pour les molécules d'eau.

L'emploi d'isotopes a ainsi permis de préciser le sens de termes restés vagues, quoique constamment utilisés, notamment du terme assimilable. Celui-ci devrait à notre avis être réservé aux ions diffusibles. L'alimentation des racines commence nécessairement par une diffusion de molécules ou d'ions à partir du milieu extérieur, ou par l'entraînement de corps dissous dans l'eau aspirée. On objectera que les racines peuvent absorber des ions de corps solides après les avoir dissous. Il nous paraît préférable de dire dans ce cas que les racines ont rendu ces ions assimilables. Il a été en effet constaté que les racines peuvent absorber des ions de corps solides après dissolution de ceux-ci, sans nécessairement absorber davantage d'ions des espèces concernées (JACQUINOT, 1964).

Le terme diffusible pourrait d'ailleurs remplacer avantageusement le terme échangeable, le premier étant plus général. L'absorption ou la désorption de certains

ions, d'ions-phosphate notamment, peut résulter en partie du déplacement de paires anions-cations, et non seulement d'échanges d'ions de même signe. Le maintien de l'électroneutralité des adsorbats du sol détermine seulement l'excès des cations sur les anions dans les couches diffuses, mais non leur concentration globale (BOLT, 1955). L'adsorption supplémentaire de $Ca^{++}$ par addition de $Ca(OH)_2$ s'accompagne, entre certaines limites de pH, d'une adsorption supplémentaire d'ions $PO_4$ demeurant diffusibles (SCHOEN *et al.*, 1954 ; BARBIER *et al.*, 1965).

Il y aurait intérêt à conserver au mot fixé son sens vulgaire — à savoir devenu immobile — en le réservant à des ions dont le déplacement n'est pas perceptible au bout d'un temps suffisamment long, variable selon le problème à résoudre, par exemple plusieurs années en ce qui concerne l'évolution des ions $PO_4^{---}$ dans le sol en place. Actuellement, ce terme désigne, comme son équivalent rétrogradé, implicitement ou explicitement, des ions « difficilement » ou lentement échangeables, ce qui risque de faire retomber dans d'anciens errements.

La méthode de l'échange isotopique entre différentes portions d'espace (ou autodiffusion) est particulièrement commode pour étudier la diffusibilité d'ions retenus dans le sol ; elle évite l'obligation de séparer ces ions de leurs supports solides. Elle doit permettre ainsi d'approfondir les problèmes de fixation et de libération d'ions, qui sont loin d'être résolus, notamment dans le cas du phosphore.

La fumure phosphatée a posé depuis longtemps et pose encore aujourd'hui une question de portée très générale : est-il nécessaire d'enrichir indéfiniment le sol en phosphore, par des apports supérieurs aux exportations, comme le font des formules actuelles d'engrais, pour maintenir les cultures à l'optimum de nutrition phosphorée ? Il en serait bien ainsi si les phosphates des engrais étaient partiellement fixés dans le sol sous des formes non diffusibles et non susceptibles de redevenir diffusibles sous l'action des racines, des microorganismes, des petits animaux, ou éventuellement à la suite de remaniements structuraux.

Les méthodes isotopiques appliquées au sol n'étant pas parfaitement au point, notamment en ce qui concerne le phosphore, ce mémoire comportera un exposé méthodologique avant d'aborder les applications agronomiques.

## II. — MÉTHODOLOGIE

L'utilisation d'un isotope du phosphore naturel en agronomie peut répondre à deux catégories d'objectifs très différents, comme c'est le cas pour toute paire d'isotopes. Ces deux objectifs sont :

— la dilution isotopique, aboutissement de l'échange isotopique ;

— la détermination du phosphore originaire d'une source individualisée dans le sol, et transféré dans un compartiment quelconque du système plante-sol.

Dans le premier cas, on mélange aussi intimement que possible avec le sol un phosphate soluble ou dissous dans l'eau, marqué par $^{32}P$ (avec ou sans entraîneur, c'est-à-dire avec ou sans phosphate à $^{31}P$), et on laisse se réaliser par échanges, en présence d'eau, le mélange des ions $PO_4^{---}$ ajoutés avec ceux préexistants dans le sol à l'état diffusible, selon le processus indiqué dans l'Introduction. Une fois l'équilibre réalisé, la composition isotopique des $PO_4^{---}$ diffusibles, c'est-à-dire la propor-

tion des $^{32}PO_4^{---}$ et des $^{31}PO_4^{---}$, est uniforme, les premiers ayant pratiquement les mêmes affinités que les seconds. Il n'y a plus alors qu'un seul ensemble d'ions $^{31}PO_4^{---}$ parmi lesquels se trouvent uniformément distribués les $^{32}PO_4^{---}$. Le but poursuivi est de déterminer la quantité de P du sol avec laquelle s'est mélangée P ajouté, sans avoir besoin de séparer du sol le mélange en question.

Au contraire, si l'on a localisé un engrais phosphaté dans une petite portion du sol, ou mélangé avec le sol un phosphate qui ne s'y dissout que très lentement, une apatite par exemple, les ions-phosphate ajoutés constituent une source de phosphore réellement distincte du phosphore préexistant ; la méthode isotopique permet alors de suivre le transfert de ce phosphore dans la plante ou plus généralement dans une portion quelconque du système plante-sol.

Dans le premier cas, les échanges isotopiques sont l'objet de la recherche. Dans le deuxième cas, ils sont gênants : le phosphate originaire de l'engrais localisé ou de l'apatite, une fois dissous, se démarque peu à peu, par dilution dans le phosphate diffusible préexistant.

## A. — La dilution isotopique

### 1. — *Principe*

Le principe de la méthode de dilution isotopique vient d'être esquissé. Une fois atteint l'équilibre de l'échange isotopique, on peut écrire, en représentant les $^{32}PO_4^{---}$ et $^{31}PO_4^{---}$ diffusibles par $^{32}P$ et $^{31}P$ pour simplifier l'écriture :

$$\frac{^{32}P}{^{31}P} \text{ dans l'ensemble} = \frac{^{32}P}{^{31}P} \text{ dans une fraction de l'ensemble}$$

Les numérateurs s'expriment en radioactivité, en coups/minute par exemple, les dénominateurs en poids de phosphore ou en nombre de moles.

On connaît la quantité totale de l'un des constituants du mélange, le $^{32}P$ ajouté. Il suffit de déterminer la composition isotopique de P, en comptant $^{32}P$ et en dosant chimiquement le phosphate dans une fraction de ce mélange (dans un volume quelconque de la solution par exemple) pour pouvoir calculer le 4e terme, c'est-à-dire la quantité totale du phosphate isotopiquement dilué dans l'essai. On en retranche éventuellement le phosphate soluble ajouté comme entraîneur pour obtenir le phosphate isotopiquement diluable (ou isotopiquement échangeable) préexistant dans le sol.

Tel est le principe.

En fait, la formule précédente est très souvent appliquée avant que l'équilibre isotopique ne soit atteint, ce qui peut demander plusieurs mois (voir ci-dessous, cinétique). P du sol calculé selon cette formule à partir de mesures effectuées après un temps variable est considéré comme isotopiquement dilué au bout de ce temps. C'est là un moyen commode, quoiqu'assez grossier, d'étudier la progression de l'échange isotopique. Mais il faut noter que $PO_4^{---}$ diffusible ainsi déterminé ne peut être qu'inférieur à la masse des $PO_4^{---}$ du sol atteints par le front de la diffusion des $^{32}PO_4$ à l'intérieur des particules solides. En effet, tant que l'équilibre n'est pas atteint, le rapport $^{32}P/^{31}P$ décroît depuis les couches externes jusqu'aux compartiments internes atteints en dernier lieu. Il paraît actuellement difficile d'apprécier en fonction du temps la masse des $PO_4^{---}$ du sol intéressée par ce gradient.

L'expérience suivante illustre le point précédent :

Une suspension aqueuse d'un sol de boulbène a été additionnée d'une solution $^{32}PO_4^{---}$ sans entraîneur, puis agitée 24 heures, au cours desquelles une résine (base faible Dowex 2 × 4) a été ajoutée après un temps variable. De sorte que la résine a réagi pendant un temps croissant avec un sol précontacté par $^{32}PO_4^{---}$ pendant un temps décroissant. Les résultats, indiqués au tableau 1, montrent que la radioactivité spécifique de P extrait par la résine passe par un minimum, ce qui suggère l'explication suivante :

Pour des temps de contact courts de la résine, la durée de l'échange isotopique a relativement peu varié ; mais la résine, au fur et à mesure que la durée de son contact augmente, extrait un mélange isotopique situé à une profondeur croissante dans les particules, donc de radioactivité spécifique décroissante. Par la suite, le temps de précontact de $^{32}PO_4^{---}$ devenant plus court, la radioactivité demeurée en majeure partie dans des couches peu profondes, repasse en plus forte proportion dans la résine.

Des faits analogues ont été constatés dans le cas d'un sol calcaire. Une expérience d'échange isotopique en retour, décrite plus loin (voir cinétique) confirmera que des ions $PO_4^{---}$ qui viennent d'être adsorbés par un sol sont sollicités aussi bien vers l'intérieur que vers l'extérieur des particules solides.

TABLEAU 1

*Action d'une résine sur un sol de boulbène précontacté par $^{32}PO_4^{---}$ pendant un temps variable*

| Durée de contact de la résine (heures) | 0 | 1/4 | 1/2 | 1 | 4 | 7 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Durée du précontact de $^{32}PO_4^{---}$ (heures) | 24 | 23,3/4 | 23,1/2 | 23 | 22 | 17 | 0 |
| Radioactivité spécifique relative de P extrait par la résine | 729 | 609 | 587 | 720 | 843 | 816 | 1 190 |

Une autre critique de principe se fonde sur le fait que l'autodiffusion d'ions n'implique pas nécessairement leur diffusibilité. Il arrive en effet que les ions constitutifs de certains cristaux puissent s'échanger contre des ions de même espèce de la solution extérieure, mais non contre des ions d'espèce différente. Dans ce cas, l'ensemble de ces ions du solide n'est pas expansible, puisque l'échange de l'un d'eux contre un ion de même espèce de la solution ne modifie pas la distribution spatiale de l'espèce d'ions considérée. Voici un exemple de cette difficulté :

L'un de nous a trouvé antérieurement qu'environ 1 p. 100 de P d'un phosphate naturel de Gafsa, à l'état de poudre passant au tamis 300, a été isotopiquement dilué en phase solide après 1 mois d'agitation d'une suspension aqueuse (BARBIER et QUILLON, 1954). D'autres mesures ont indiqué 2 p. 100 en 3 semaines. Mais d'après MATTSON (1951), les fines particules de phosphates calciques basiques, électropositives, ont la faculté d'adsorber réversiblement des ions-phosphate, qui demeurent échangeables contre d'autres anions.

Une troisième critique concerne l'interférence possible d'échanges isotopiques entre P organique et P minéral, en présence d'enzymes spécifiques émises par les microorganismes ou les racines (voir ci-dessous action des racines sur la phytine).

### 2. — *Prélèvement d'une fraction du mélange isotopique*

Une fois la dilution isotopique réalisée, il reste à déterminer la composition isotopique du mélange d'ions-phosphate diffusibles. D'après ce qui précède, ce sont les ions-phosphate de la solution aqueuse qu'il faut analyser, si l'on se propose d'évaluer la quantité d'ions phosphate diffusibles au départ de l'alimentation d'une racine, alors que celle-ci n'a pas encore pu modifier l'état du phosphore du sol.

La composition isotopique de P des plantes, ou éventuellement de P en solution après agitation dans l'eau du sol ayant subi l'action des racines, correspond à une donnée plus globale, puisqu'à P diffusible préexistant peut s'ajouter du P rendu diffusible par l'action des racines.

Il serait assurément intéressant de comparer les radioactivités spécifiques de P extrait par divers réactifs, surtout après un temps variable d'agitation. Mais ce n'est pas là le but de ce mémoire.

a) *Dilution isotopique par agitation du sol dans l'eau.*

α) *Observations techniques.*

$\alpha_1$) *Emploi des résines.* — En raison de l'extrême dilution des phosphates dans l'extrait aqueux de nombreux sols, on a proposé d'employer des résines pour les

TABLEAU 2

*P extrait par une résine Dowex base forte*

| Sol | Argilo-calcaire Cadarache | | Limon pH 6,1 Versailles | | Terra rossa Antibes | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Temps de contact sol-résine en mn | µg P extrait par g sol | Radioactivité spécifique | µg P extrait par g sol | Radioactivité spécifique | µg P extrait par g sol | Radioactivité spécifique |
| 0 | 0,51 | 612 | 1,79 | 178 | 0,10 | 8 950 |
| 10 | 1,51 | 401 | 5,6 | 127 | 3,36 | 873 |
| 15 | 2,25 | 334 | 5,19 | 153 | 1,57 | 2 489 |
| 30 | 4,06 | 297 | 5,71 | 157 | 2,05 | 3 300 |
| 45 | 2,81 | 466 | 7,59 | 161 | 1,39 | 6 245 |
| 60 | 2,38 | 568 | 6,89 | 175 | 1,61 | 6 807 |
| 120 | 2,91 | 611 | 7,42 | 178 | 2,57 | 7 391 |
| 180 | 3,24 | 654 | 9,16 | 178 | 2,61 | 9 523 |

concentrer, afin de faciliter leur dosage chimique. Voici les résultats que nous avons obtenus avec une résine Dowex base forte à l'état $Cl^-$ (2 × 4), pour trois sols différents ; 1 g de résine a été ajouté à une suspension de 5 g de sol dans 50 ml d'eau, préalablement agitée 4 jours en présence de $^{32}P$. La résine a été ensuite séparée par tamisage, puis éluée par 15 ml $H_2SO_4$ 0,5 N (tabl. 2, fig. 1).

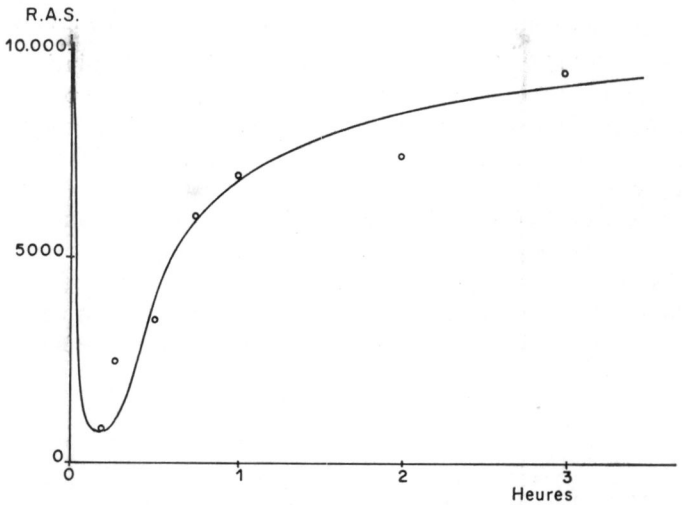



FIG. 1. — *Terre rouge d'Antibes : radioactivité spécifique en fonction du temps de contact sol-résine*

Ainsi pour les 3 sols étudiés, l'activité spécifique de P extrait par la résine passe par un minimum après un temps assez court, 1/2 heure au maximum, pour remonter ensuite approximativement à sa valeur initiale. Cette anomalie nous paraît difficilement explicable, si ce n'est par l'hypothèse suivante : la résine abaisse fortement la concentration en phosphate de la solution, ce qui libérerait du phosphore non diffusible, en quantité importante par rapport à P de la solution initiale, mais relativement petite par rapport à l'ensemble de P diffusible.

Les résines doivent donc être utilisées avec prudence, leur emploi étant à exclure pour les études cinétiques. Peut-être conviendrait-il d'ajouter la résine à un volume suffisant de solution préalablement séparée du sol.

$\alpha_2$) *Erreurs de mesure dues à P organique.* — Certaines méthodes colorimétriques classiques opèrent la réduction des complexes phosphomolybdiques en milieu acide à chaud, ce qui favorise l'hydrolyse de composés organiques phosphorés éventuellement présents dans la solution du sol, tels des oses-phosphate ; d'où une erreur par défaut sur la mesure de la radioactivité spécifique de P minéral, si ces composés organiques ne sont pas marqués ou moins marqués que P minéral.

L'un de nous a mis au point une méthode qui évite la réduction du complexe phosphomolybdique. Celui-ci est extrait par l'alcool isobutylique ; le molybdène est dosé par absorption atomique (FARDEAU et MICHEL, 1969).

Pour la même raison, il n'y a pas lieu de rejeter *a priori* la réduction par le chlorure stanneux, qui s'opère à froid et qui a l'avantage d'une grande sensibilité.

Par ailleurs, si des composés organiques phosphorés sont marqués, et si leur P

n'est pas dosé, il en résulterait une erreur par excès sur la radioactivité spécifique de P minéral, puisque $^{32}P$ de ces composés sera compté.

Ces erreurs ne sont probablement pas graves dans des sols non humifères riches en P minéral.

Pour éviter les erreurs dues aux échanges entre P minéral et P organique, il conviendrait d'empêcher tout processus enzymatique. Une irradiation $\gamma$ de 5 000 kilorads suffit en général pour tuer les microorganismes et détruire les enzymes du sol.

$\alpha_3$) *Hétérogénéité de répartition de* $^{32}P$. — La pratique de la dilution isotopique des phosphates dans le sol donne parfois l'occasion de constater que peu de temps après l'addition de $^{32}PO_4^{---}$ à une suspension de sol, la radioactivité spécifique de P en solution augmente fortement, pour rediminuer ensuite. En voici un exemple (FARDEAU et MARINI, 1967) :

A 10 g d'un sol calcaire préalablement agité avec 95 ml d'eau, on a ajouté 5 ml d'une solution de phosphate monopotassique contenant 2 mg P, marqué par $^{32}P$. La radioactivité spécifique de P en solution a varié selon le diagramme A de la figure 2. Si l'on appliquait la formule de dilution isotopique, $PO_4^{---}$ du sol calculé comme isotopiquement dilué varierait selon le diagramme B de la même figure.

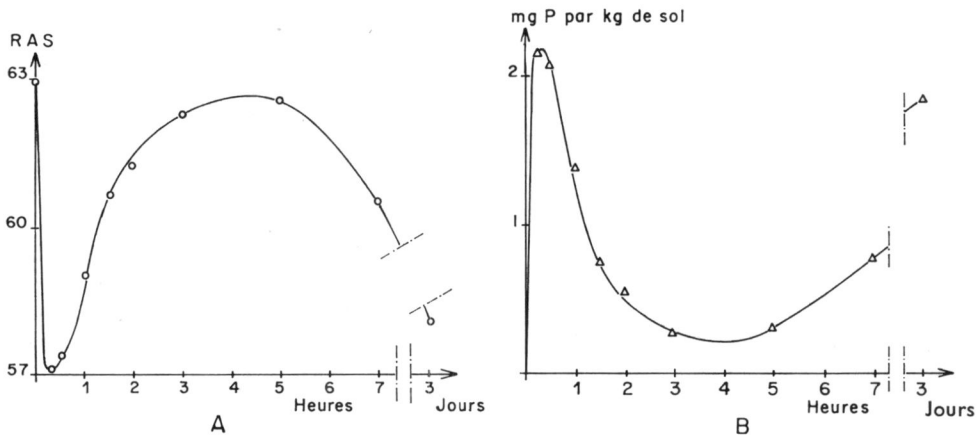



FIG. 2. — *Radioactivité spécifique de P en solution et P du sol calculé comme isotopiquement dilué, après addition de* $^{32}PO_4^{---}$ *avec entraîneur à forte concentration*

Cette anomalie est vraisemblablement la conséquence, en l'espèce, d'un blocage temporaire de $^{32}P$ par précipitation d'un phosphate calcique, qui se redissout ensuite en libérant $^{32}P$, à mesure que la concentration en $PO_4^{---}$ de la solution diminue. Mais il est probable que dans ce milieu calcique basique, le phosphate bicalcique initialement formé laissera un résidu apatitique insoluble dans le milieu considéré. Une partie de $^{32}P$ introduit resterait bloquée dans le résidu et la radioactivité spécifique de P en solution serait inférieure à celle correspondant à une répartition uniforme.

Cette erreur ne doit pas être exceptionnelle lorsqu'on ajoute un engrais phosphaté soluble marqué à une terre calcaire, ou même non calcaire mais saturée de Ca.

Envisageons maintenant le cas de $^{32}PO_4^{---}$ ajouté sans entraîneur ou avec une trace seulement d'entraîneur, ce qui exclut la précipitation de $^{32}PO_4^{---}$. Supposons que le sol expérimenté contienne des agrégats primaires stables et compacts, mais

perméables aux petits ions, et possédant vis-à-vis de $PO_4^{---}$ un fort pouvoir adsorbant externe et interne (cas du sol rouge étudié p. 321). Les premières surfaces de terre contactées par la solution radioactive se chargeront de $^{32}P$, qui diffusera ensuite longtemps dans les agrégats, à des concentrations supérieures à celles correspondant au cas idéal d'une répartition uniforme de $^{32}P$ dès l'instant 0. La cinétique de l'échange isotopique serait perturbée. Mais nous n'avons pas constaté qu'il puisse en résulter une erreur sur le taux de dilution isotopique à l'équilibre.

β) *Cinétique.*

D'après de nombreuses références bibliographiques (BLANCHET, 1958), l'échange isotopique des ions $PO_4^{---}$ dans le sol, comme l'adsorption et la désorption de ces mêmes ions et de nombreux autres, comporte une première phase très rapide, suivie d'une lente progression, laquelle peut durer longtemps. Dans un sol argilo-calcaire du domaine de Cadarache en suspension aqueuse quotidiennement agitée, l'échange isotopique s'est poursuivi pendant au moins 45 jours, en milieu non aseptique il est vrai (FARDEAU et MARINI, 1967). Même lorsque les réactions enzymatiques sont en principe entravées par l'addition d'inhibiteurs chimiques, l'équilibre isotopique semble rarement atteint au cours des expériences usuelles de laboratoire. Ce fait ne peut guère être la conséquence d'une lente dissolution de phosphates cristallisés, car il s'observe dans des sols neutres ou légèrement acides, où la présence de tels phosphates est peu probable. La lente et durable progression de la dilution isotopique des ions $PO_4^{---}$ est due selon toute vraisemblance à une extension des échanges isotopiques à l'intérieur des agrégats, ou des particules élémentaires.

L'agronome est intéressé aussi bien par les rapides échanges initiaux que par les échanges lents qui leur font suite. Les premiers renseignent sur l'aptitude du sol à alimenter les radicelles qui cheminent dans le sol, pendant la courte durée de contact (de l'ordre de 24 h) de chaque zone pilifère avec chaque élément de surface parcouru. Les seconds renseignent sur l'aptitude du sol à réapprovisionner les surfaces externes des particules en ions $PO_4^{---}$, ou au contraire à absorber sous forme lentement diffusible les reliquats d'engrais phosphatés.

$\beta_1$) *Réalisation d'un état stationnaire.* — La diffusibilité des ions-phosphate du sol ne peut être étudiée correctement par échange isotopique que si le système sol-eau demeure en état stationnaire quant à la distribution des $^{31}PO_4^{---}$. S'il n'en est pas ainsi, la diffusion de ces derniers se superpose au processus d'autodiffusion que l'emploi de $^{32}P$ a pour objet d'étudier. Ce serait le cas en particulier si $^{32}PO_4^{---}$ était ajouté avec une quantité notable d'entraîneur, comme on l'a vu plus haut (fig. 2). Même en présence d'une faible concentration d'entraîneur, de l'ordre du mg P par litre, nous avons observé un décalage de l'échange isotopique, par comparaison avec la méthode décrite ci-dessous.

Rappelons cependant qu'il est utile que la solution de $^{32}PO_4^{---}$ renferme une trace de $^{31}PO_4^{---}$ pour minimiser l'adsorption de $^{32}PO_4^{---}$ par la verrerie utilisée.

Compte tenu des remarques précédentes, deux d'entre nous ont proposé d'employer comme entraîneur de $^{32}PO_4^{---}$ la solution du sol elle-même. Voici le mode opératoire adopté (FARDEAU et MARINI, 1967).

Un mélange sol-eau 1/10 est agité pendant 48 heures, puis centrifugé. Nous avons constaté que ce temps d'agitation ne serait pas suffisant pour un sol qui ne

serait pas déjà en équilibre approximatif, qui aurait reçu par exemple des engrais phosphatés depuis moins de 1 ou 2 ans. Le surnageant est additionné de $^{32}PO_4^{---}$ sans entraîneur. A une suspension de sol préparée comme la précédente, préalablement agitée 48 heures, on ajoute progressivement la solution radioactive obtenue, à raison par exemple de 5 ml par 100 ml de suspension vivement agitée par un dispositif magnétique.

On pourrait objecter que le petit volume de solution radioactive ajouté ne peut guère troubler l'équilibre si sa concentration en $PO_4^{---}$ est suffisamment petite, et qu'il serait plus simple, comme on le fait habituellement, d'employer une solution $^{32}PO_4^{---}$ de concentration fixe en phosphate entraîneur, la même dans tous les cas, par exemple 0,1 mg P par litre. Mais il nous paraît que c'est une solution en équilibre avec le sol qui offre le maximum de garanties.

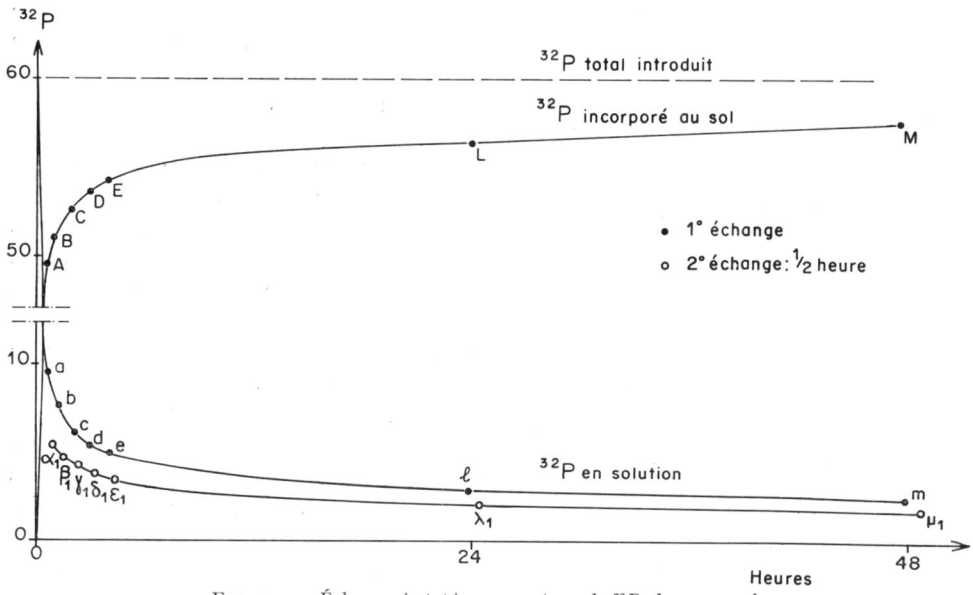



FIG. 3. — *Échange isotopique en retour de $^{32}P$ dans un sol*

$\beta_2$) *Échange isotopique en retour.* — L'examen des diagrammes traduisant la cinétique de l'échange isotopique d'ions-phosphate entre des particules de terre et de l'eau suggère l'existence de plusieurs compartiments, que l'analyse graphique ne permet pas de délimiter ; on trouve en effet rarement des points alignés sur des portions de droite en coordonnées semi-logarithmiques, même en se donnant des valeurs probables de la limite de l'échange, apparemment inaccessible dans de nombreux cas. La méthode d'échange isotopique en retour décrite ci-après a permis de déterminer un compartiment d'ions-phosphate particulièrement mobiles (FARDEAU et MARINI, 1967).

Un premier échange isotopique $E_1$ est réalisé dans une suspension aqueuse de sol en état stationnaire, selon la méthode décrite à l'alinéa précédent. Après un temps variable d'agitation, la solution $S_1$ est séparée par centrifugation et le culot est immédiatement remis en suspension dans une solution $S_2$ identique à $S_1$, mais non

radioactive. Il en résulte un deuxième échange $E_2$, inverse de $E_1$. Les données obtenues pour un sol argilo-calcaire de Cadarache, en faisant varier la durée de $E_1$ et de $E_2$, sont reportées au tableau 3 et aux figures 3 et 4, avec les notations suivantes : les points tels que A, B, ..., N correspondant au $^{32}P$ passé en phase solide pendant $E_1$, et les points homologues *a*, *b*,..., *n* à celui resté en solution. Les points $\alpha_1$, $\alpha_2$, ..., $\alpha_i$ ; $\beta_1$, $\beta_2$, ..., $\beta_i$ ; ... ; $\nu_1$, $\nu_2$, ..., $\nu_i$, correspondent au $^{32}P$ repassé dans la solution $S_2$ pendant des temps croissants de $E_2$, lorsque $E_1$ a cessé en A, B, ..., ou N. La colonne 4 du tableau 3 et la figure 3 montrent que pour une durée croissante de $E_1$ et une durée constante de $E_2$ (1/2 h), $^{32}P$ repassé en solution décroît ($\alpha_1 > \beta_1 > \gamma_1$ ...) bien que la charge en $^{32}P$ de la phase solide aille en croissant (points A, B, C, ...). Ces résultats ne sont pas compatibles avec l'existence d'un compartiment unique, qui impliquerait $\alpha_1 < \beta_1 < \gamma_1$.

TABLEAU 3

*Échange isotopique en retour de $^{32}P$ dans un sol argilo-calcaire*

| $E_1$ | | | $E_2$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Durée de $E_1$ en heures | $^{32}P$ resté dans la solution $S_1$ | $^{32}P$ passé sur les particules | $^{32}P_{(\nu i)}$ repassé dans la solution $S_2$ pour une durée de $E_2$ égale à : | | | |
| | | | 1/2 h | 1 h | 4 h | 24 h |
| *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* |
| 0 | 59 375 | 0 | | | | |
| 0,5 | *a* 9 930 | A 49 445 | $\alpha_1$ 5 600 | $\alpha_2$ 5 220 | $\alpha_3$ 4 700 | $\alpha_4$ 2 460 |
| 1 | *b* 8 000 | B 51 375 | $\beta_1$ 4 950 | | | |
| 2 | *c* 6 345 | C 53 030 | $\gamma_1$ 4 430 | | | |
| 3 | *d* 5 500 | D 53 875 | $\delta_1$ 4 000 | | | |
| 4 | *e* 4 925 | E 54 150 | $\varepsilon_3$ 3 900 | $\varepsilon_2$ 3 870 | $\varepsilon_3$ 3 500 | $\varepsilon_4$ 2 350 |
| 24 | *l* 2 900 | L 57 475 | $\lambda_1$ 2 420 | $\lambda_2$ 2 420 | $\lambda_3$ 2 370 | $\lambda_4$ 2 300 |
| 48 | *m* 2 300 | M 57 075 | $\mu_1$ 1 930 | $\mu_2$ 1 930 | | |

La figure 4 représente la variation de la radioactivité de $S_2$ au cours de $E_2$ pour différentes durées de $E_1$ (1/2 h, 4 h, 24 h). $^{32}P$ repassé en $S_2$ atteint dans tous les cas, d'après d'autres mesures, un maximum en moins de 5 minutes, puis décroît selon une cinétique analogue à celle observée en $E_1$. Ces résultats prouvent qu'une fraction des ions $PO_4^{---}$ des particules solides s'échange presque instantanément avec ceux de la solution, et que l'échange se poursuit en phase solide contre des ions $PO_4^{---}$ moins rapidement accessibles.

Ainsi le double comportement de $^{32}P$ pendant $E_2$, à savoir :

$$\alpha_1 > \beta_1 > \gamma_1 \ldots$$
$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 \ldots$$

permet de conclure que les ions-phosphate isotopiquement échangeables du sol forment un ensemble hétérogène, dont une fraction, de masse $M_1$, est à chaque instant en équilibre avec les ions de la solution, de masse $M_0$, et forment avec eux un « compartiment » unique.

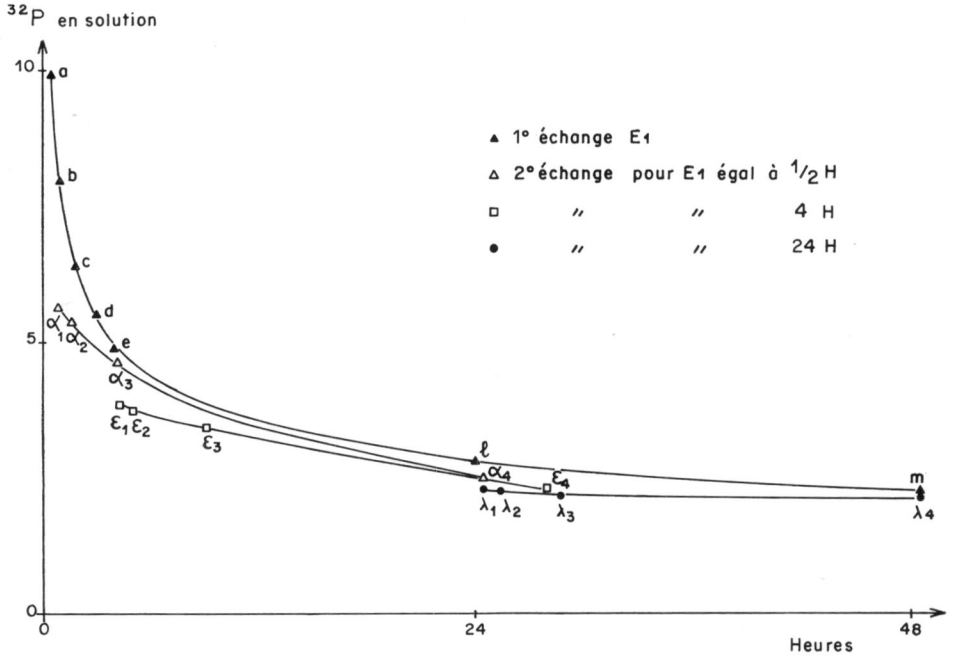



FIG. 4. — *Échange isotopique en retour de $^{32}P$ dans un sol*

La détermination quantitative de $M_0 + M_1$, irréalisable par la méthode graphique, est possible si l'on tient compte des remarques suivantes :

1° Les masses de phosphate $M_0$ et $M_1$ ne varient pas au cours des échanges, puisque le système est en état stationnaire.

2° Après un échange $E_1$ prolongé, l'ensemble $M_0 + M_1$, ne cède à des compartiments plus lointains qu'une quantité négligeable de $^{32}P$ au cours de $E_2$ si celui-ci ne dure pas trop longtemps, soit 1/2 heure à 1 heure d'après les données des colonnes 4 et 5 du tableau 3 : le remplacement de $S_1$ par $S_2$ provoque essentiellement une dilution de $^{32}P$ de $M_1$ dans $M_1 + M_0$ ; la radioactivité spécifique étant $\frac{n_i}{M_0}$ à la fin de $E_1$, et devenant $\nu_i/M_0$ au début de $E_2$, on peut écrire la relation :

$$M_1 \times \frac{n_i}{M_0} = (M_1 + M_0) \frac{\nu_i}{M_0}$$

qui permet de calculer $M_1$, puisque $n_i$, $\nu_i$ et $M_0$ sont mesurés.

3° La validité de cette détermination est confirmée par le fait que le rapport $n_i/\nu_i$ des radioactivités des solutions $S_1$ et $S_2$ tend, pour $E_1$ suffisamment long et $E_2$ suffisamment bref, vers une valeur bien définie (col. 2 et 3 du tabl. 4).

TABLEAU 4

*Échange isotopique en retour de $^{32}P$ : évolution du rapport $n_i/v_i$ des radioactivités des solutions $S_1$ et $S_2$*

| Durée de $E_1$ en heures | Durée de $E_2$ en heures | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1/2 | 1 | 4 | 24 |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| 0,5 | 1,75 | 1,9 | 2,12 | 4,11 |
| 1 | 1,65 | | | |
| 2 | 1,50 | | | |
| 3 | 1,32 | | | |
| 4 | 1,26 | 1,25 | 1,40 | 1,72 |
| 24 | 1,20 | 1,20 | 1,22 | 1,26 |
| 48 | 1,20 | 1,20 | | |

Le tableau 5 fournit deux exemples d'application de cette technique.

TABLEAU 5

*Échange isotopique en retour. Exemples d'application*

Les quantités de phosphore sont exprimées en mg de phosphore par kg de sol

| | Sol argilo-calcaire A | Sol rouge méditerranéen B |
|---|---|---|
| Phosphore en solution $M_0$ (sol/eau = 1/10) | 0,4 | 0,1 |
| Compartiment $M_1$ | 2 | 1,1 |
| Compartiment $M_0 + M_1$ | 2,4 | 1,2 |
| Phosphore échangé en 24 h | 9,6 | 56 |
| Phosphore total | 550 | 820 |

Ces expériences confirment que la progression de l'échange isotopique au cours du temps n'est pas la conséquence d'une dissolution de phosphates $^{31}P$, mais une extension de la diffusion en phase solide, puisque $^{32}P$ en solution diminue constamment. Dans le cas du sol rouge méditerranéen expérimenté, la diffusion de $^{32}P$ à l'intérieur des agrégats a été particulièrement importante. C'est dans des cas de ce genre qu'une macrohétérogénéité initiale de répartition de $^{32}PO_4^{---}$ peut ne disparaître qu'après une longue durée d'agitation.

$\beta_3$) *Limite de l'échange isotopique.* — Il serait très utile de savoir si à la fin d'expériences d'une durée compatible avec la période relativement brève de $^{32}P$, la dilution isotopique approche de sa limite ou si elle en est éloignée. C'est là à notre avis une question d'importance primordiale. Supposons en effet que dans un sol enrichi en phosphate par des applications répétées d'engrais, l'accroissement de $PO_4^{---}$ diffusible, déterminé par la dilution isotopique dans les conditions décrites, ne dépasse pas 50 p. 100 par exemple des reliquats d'engrais, comme c'est le cas de sols étudiés plus loin. Si c'est là une limite réelle, cela prouve que la moitié de ces reliquats a été fixée irréversiblement, et justifie l'emploi continu de doses d'engrais qui enrichissent indéfiniment le sol en phosphore total. Au contraire, si ce n'est pas une limite, c'est que ces reliquats demeurent au moins en partie lentement diffusibles, et sont donc capables de réapprovisionner les compartiments externes en $PO_4^{---}$ rapidement diffusible.

Pour en décider, il faut pouvoir déterminer avec précision la pente des diagrammes cinétiques en fin d'expérience. Cette pente étant toujours très petite sinon nulle, il est nécessaire d'avoir recours à une technique de mesure irréprochable, et d'opérer en milieu rigoureusement aseptique (après stérilisation du sol par irradiation $\gamma$ par exemple). En outre, il est de beaucoup préférable de porter en ordonnées les radioactivités comptées en solution, plutôt que les radioactivités spécifiques qui nécessitent la répétition du dosage chimique pour chaque point. La radioactivité en solution est mesurable en effet avec beaucoup plus de précision que la concentration en $PO_4^{---}$ minéral. Il importe peu d'ailleurs que le système soit parvenu ou non à un état strictement stationnaire, car si la diffusion des $^{31}PO_4^{---}$ se poursuit en même temps que celle des $^{32}PO_4^{---}$, c'est une preuve de plus que le système n'a pas encore atteint son équilibre, et c'est précisément ce que l'on cherche à savoir.

En vue de préciser la limite des échanges isotopiques, il peut être utile d'accélérer la diffusion en phase solide par des interventions n'altérant pas l'état chimique du sol. Les alternances de dessiccation et d'humectation sont connues comme accélérant la diffusion de divers ions dans les particules du sol : potassium (CHAMINADE, 1936 ; ATTOE, 1946), phosphate (BARBIER et TYSZKIEWICZ, 1954), borate (BARBIER et CHABANNES, 1955). Dans les sols utilisés pour les présentes recherches, les dites alternances ont permis d'obtenir un taux de dilution isotopique de $^{32}P$ du même ordre qu'une agitation prolongée à froid. L'ébullition a également accéléré l'échange isotopique de $^{32}P$.

Une expérience comportant l'étude de la limite de la dilution isotopique de $^{32}P$ sera décrite ci-dessous (paragraphe III A).

$\gamma$) *Conclusion sur la méthode de dilution isotopique dans l'eau.*

Malgré les difficultés d'exécution qui viennent d'être rappelées, il est incontestable que la méthode de dilution isotopique a fait accomplir un progrès marqué à nos connaissances sur le fonctionnement chimique du sol, notamment en ce qui concerne les ions $PO_4^{---}$. Son principal avantage sur les méthodes chimiques est qu'elle évite l'obligation d'extraire ces ions, soit par des réactifs qui altèrent leurs liaisons, soit par l'eau qui ne sépare qu'une très petite fraction des ions $PO_4^{---}$ diffusibles, et nécessiterait en conséquence d'innombrables extractions successives (SAIDEL, 1927).

On pourrait objecter à la méthode de l'échange isotopique en présence d'un grand volume d'eau qu'elle s'écarte beaucoup des conditions naturelles d'humidité,

et lui opposer la méthode de l'échange isotopique en pâte, par la technique des pastilles accolées notamment. Mais celle-ci enregistre essentiellement la diffusion de particule en particule par le canal d'étroites manchettes, les ions devant en outre contourner les particules ou traverser leur épaisseur. La méthode des pastilles accolées ne permet pas d'étudier les échanges qui ont lieu entre chaque particule solide et une cellule absorbante racinaire qui épouse sa surface. L'échange isotopique en suspension aqueuse nous paraît fournir sur l'aptitude du sol à alimenter les racines des renseignements que l'échange isotopique en pâte ne peut procurer à lui seul.

b) *Dilution isotopique déterminée par analyse de plantes.*

Si l'on a intimement mélangé un phosphate soluble marqué avec la terre d'un vase de culture, et si l'on y cultive des plantes suffisamment longtemps pour que P des graines devienne négligeable par rapport à P prélevé sur le sol, la radioactivité spécifique de P des plantes permet de calculer d'après la formule ci-dessus une valeur de P isotopiquement diluable du sol (dite valeur L, initiale du nom de S. LARSEN, 1952), qui devrait être au moins égale à celle trouvée par agitation dans l'eau, puisque les racines ne peuvent que provoquer une dilution isotopique supplémentaire par attaque de composés phosphorés minéraux ou organiques du sol.

C'est effectivement le cas des sols qui ont fait l'objet de l'expérience décrite ci-après, laquelle montre à nouveau les difficultés d'interprétation des mesures isotopiques en la matière étudiée.

Divers engrais phosphatés, contenant 65 mg P, ont été mélangés à sec dans un agitateur rotatif avec 1 kg de terre ; le mélange a été ensuite humecté de 80 ml d'une solution $^{32}PO_4^{---}$ avec une trace d'entraîneur, versés peu à peu dans la masse continuellement brassée avec une spatule. Une culture d'orge a été réalisée en pots « Riviéra », par dépôt de plantules obtenues par la méthode STANFORD (1957). Pour le calcul de la radioactivité spécifique de P absorbé par les plantes, on a retranché de P total des plantes P apporté par les plantules. De la quantité totale de P isotopiquement dilué, calculé d'après la formule ci-dessus, on a retranché P des phosphates

TABLEAU 6

*P isotopiquement diluable du sol* ($P_i$) *en mg P par kg*

(P des phosphates ajoutés a été retranché de P isotopiquement dilué)

| Nature des engrais | Sol argilo-calcaire | | | Sol rouge | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_i$ par agitation dans l'eau | | $P_i$ d'après analyse des plantes | $P_i$ par agitation dans l'eau | | $P_i$ d'après analyse des plantes |
| | Avant culture | Après culture | | Avant culture | Après culture | |
| Témoin sans engrais .. | 9,6 | 15,2 | 100 | 41 | 82 | 375 |
| Superph. ordinaire .... | 48 | 38 | 49 | 82 | 104 | 140 |
| Superph. triple..... | 49 | 45 | 40 | 90 | 101 | 140 |
| Phosph. d'ammon..... | 57 | | 44 | 83 | 126 | 196 |

solubles ajoutés, pour obtenir P isotopiquement diluable du sol. Deux sols ont été utilisés, l'un argilo-calcaire du domaine de Cadarache, l'autre une terre rouge méditerranéenne non calcaire mais basique (pH : 8,0). Les résultats figurent au tableau 6.

Dans le témoin sans engrais phosphaté, P isotopiquement diluable par agitation dans l'eau a été fortement augmenté par la culture, mais il reste très inférieur à celui calculé d'après la radioactivité spécifique de P des plantes. Ces données suggèrent que l'attaque de composés phosphorés ($^{31}P$) du sol par les racines est restée limitée à leur voisinage immédiat, sans intéresser la masse du sol, ce qui expliquerait le fait que la radioactivité spécifique de P absorbé par les plantes est beaucoup plus petite que celle trouvée en solution après homogénéisation par agitation dans l'eau.

Par ailleurs, P isotopiquement diluable préexistant dans le sol, calculé d'après la radioactivité spécifique de P des plantes, est beaucoup plus petit en présence qu'en l'absence d'engrais phosphaté, ce qui suggère deux hypothèses :

1° L'addition de phosphates solubles a réduit l'attaque de composés phosphorés du sol par les racines, y compris celle de composés organiques ; d'après Bianchetti et Sartirana (1967), l'activité des phosphatases est inhibée par l'élévation de la concentration en $PO_4^{---}$.

2° Il est également possible que l'addition de la solution $^{32}PO_4^{---}$ au sol sec contenant des phosphates très solubles, ait provoqué le blocage de $^{32}P$ dans des phosphates calciques précipités, qui se redissoudraient surtout au contact des racines.

La méthode de dilution isotopique basée sur la radioactivité spécifique de P des plantes présente l'avantage que celle-ci est mesurée avec beaucoup plus de précision que celle de P en solution aqueuse, en raison de la difficulté du dosage de $PO_4^{---}$ en solution. Mais l'exemple ci-dessus montre combien la radioactivité spécifique de P des plantes peut être difficile à interpréter, même si l'on s'est efforcé d'obtenir une répartition uniforme de la totalité de $^{32}P$ parmi les ions $^{31}PO_4^{---}$ diffusibles préexistants et les ions $^{31}PO_4^{---}$ ajoutés.

### B. — Détermination du phosphore originaire d'une source individualisée dans le sol

Lorsqu'une source de phosphore uniformément marqué par $^{32}P$ a été introduite dans une portion quelconque du système sol-plante, on peut en principe déterminer le phosphore transféré de cette source dans une autre portion du système, en divisant la radioactivité totale mesurée dans cette dernière, par la radioactivité spécifique de P de la source.

Mais il peut être malaisé sinon impossible de fabriquer par synthèse à partir de $^{32}P$ ou $^{32}PO_4^{---}$ un échantillon de la source à étudier. Certains engrais phosphatés peu solubles, comme les phosphates naturels calciques ou aluminocalciques ont pris naissance dans des conditions qu'il n'est pas possible de reproduire expérimentalement. Quant aux scories de déphosphoration des fontes, il faudrait introduire $^{32}P$ en proportion suffisante dans l'énorme masse en fusion traitée dans les convertisseurs des aciéries, comme cela fut réalisé une fois à Essen (Gericke, 1954).

L'expérimentateur dispose alors de deux possibilités :

— marquer P de la source par irradiation ;
— marquer P diffusible du sol par addition de $^{32}P$.

1. — *Activation de P de la source par irradiation aux neutrons lents*

Lorsqu'un phosphate est soumis à une irradiation neutronique, d'autres éléments que P sont radioactivés ; mais c'est là un inconvénient mineur, étant donné que l'on peut déterminer $^{32}P$ par comptage sélectif, ou éventuellement après sa précipitation en présence d'entraîneur. Plus grave serait une altération de la structure chimique ou cristalline du phosphate au cours de l'irradiation. En fait, un phosphate naturel de Gafsa irradié à Saclay pendant 36 heures par un flux de neutrons de $2{,}5 \times 10^{12} n/cm^2/s$ s'est comporté dans un sol enraciné de la même façon que le même phosphate non irradié, la dissolution de ce dernier étant déterminée par la méthode de démarquage exposée ci-dessous. Cette expérience sera décrite en détail au paragraphe III B.

2. — *Démarquage de $PO^{---}$ diffusible du sol ; (interversion des marques isotopiques)*

Une deuxième possibilité consiste à utiliser l'engrais, ou plus généralement la source de phosphore, dans son état naturel ($^{31}P$). $PO_4^{---}$ diffusible du sol est préalablement marqué par mélange intime de $^{32}PO_4^{---}$ sans entraîneur et acquiert ainsi une certaine radioactivité spécifique. La diminution de celle-ci par dissolution de P de la source renseigne sur la quantité dissoute. On en trouvera plus loin deux exemples, concernant l'attaque de la phytine et d'un phosphate naturel par les racines de plantes.

## III. — APPLICATIONS AGRONOMIQUES

### A. — Diffusibilité d'ions-phosphate anciennement enterrés

Il est couramment admis que la majeure partie des ions-phosphate enfouis dans le sol sous forme de sels solubles, y devient peu à peu solidement fixée. Ce terme paraît signifier, ou avoir signifié, que ces ions ont perdu la liberté de se répartir par diffusion entre les sites qui les retiennent et la solution du sol.

L'intérêt pratique de la question a été déjà évoqué dans l'introduction. Depuis la fin du XIX^e^ siècle, des sols cultivés reçoivent à chaque rotation plus de phosphates que les cultures n'en exportent ; la plupart des formules actuelles d'engrais continueraient à enrichir indéfiniment ces sols en phosphore, ce qui ne serait justifié que si une fraction des phosphates incorporés était fixée dans le sol sous forme définitivement non diffusible.

La présente étude concerne des échantillons de sol obligeamment fournis par diverses stations d'Agronomie, de l'Institut national de la Recherche agronomique notamment, en provenance de champs d'expériences permanents. On y a comparé l'accroissement de $PO_4^{---}$ isotopiquement échangeable ($\Delta P_{ie}$) à l'accroissement de $PO_4^{---}$ minéral total ($\Delta P_t$), résultant d'applications annuelles de superphosphate depuis de nombreuses années (Marini et Fardeau, 1970).

*Technique*

a) *Phosphate isotopiquement échangeable.*

5 g de terre sont mélangés dans une boîte de Petri à 5 ml d'une solution $^{32}PO_4^{---}$ additionnée d'une trace d'entraîneur (1 µg $^{31}P$ par ml). Après mélange, les échantillons sont séchés à

38°C, puis réhumectés par 5 ml d'eau distillée, et ainsi de suite 20 fois (25 fois pour le sol des 42 parcelles de Versailles, avec mesures toutes les 5 alternances, sur échantillons traités parallèlement). La terre est ensuite reprise par 100 ml d'eau et agitée mécaniquement pendant 4 heures, durée suffisante en l'espèce pour obtenir une répartition stationnaire de $^{31}PO_4^{---}$. Après centrifugation à 10 000 *g*, on mesure la radioactivité spécifique de $PO_4^{---}$ du surnageant. $^{32}P$ est déterminé sur coupelles par un compteur Geiger-Müller à circulation gazeuse et bas bruit de fond. Le phosphate en solution est dosé colorimétriquement selon la méthode comportant la réduction du phosphomolybdate par le sulfate d'hydrazine.

b) *Phosphore total et phosphore organique.*

Le phosphore total a été dosé par colorimétrie du phosphovanadomolybdate, après minéralisation de 5 g de sol par 30 ml d'acide perchlorique bouillant additionné de $^{32}P$ sans entraîneur. La présence de $^{32}P$ dans le résidu prouverait qu'une fraction de P n'a pas été extraite (BLACK, 1965).

La variation de P minéral diffère de la variation de P total, si P organique a lui-même varié. C'est la raison pour laquelle on a dosé ce dernier, selon SAUNDERS (1955) (augmentation par calcination de P soluble à pH : 1). P minéral a été évalué par différence.

## *Résultats et discussion*

Le tableau 7 concerne le sol des 42 parcelles de Versailles, le plus fortement enrichi des sols étudiés. Il indique seulement les radioactivités comptées en solution, pour la raison indiquée ci-dessus : étude cinétique beaucoup plus précise (II A$a\beta_3$).

TABLEAU 7

*Radioactivités (relatives) en solution, 42 parcelles de Versailles, maintenues sans culture depuis 1929*

| Traitement et date du prélèvement | Témoin sans engrais (1965) | Superphosphate | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1930 | 1952 | 1965 |
| Nombre d'alternances de dessic.-humect. | | | | |
| 1 | 8 313 | 12 340 | 16 103 | 31 954 |
| 5 | 5 979 | 8 281 | 16 176 | 23 681 |
| 10 | 4 115 | 6 630 | 14 468 | 22 099 |
| 15 | 3 567 | 5 102 | 13 000 | 19 270 |
| 20 | 3 671 | 4 948 | 12 769 | 17 051 |
| 25 | 3 648 | 5 031 | 12 629 | 17 148 |

A partir de la 20e alternance de dessiccation et d'humectation, la diminution de la radioactivité en solution n'est plus significative. La discussion statistique des variations relatives mesurées dans les 4 échantillons suggère que la diminution de la radioactivité en solution de la 20e à la 25e alternance a été inférieure à 4,5 p. 100 ou 4,3 p. 100, aux seuils de probabilité 0,01 ou 0,05 respectivement.

On peut donc admettre qu'à partir de la 20e alternance, la diffusion de $^{32}PO^{---}$ dans les particules solides est devenue extrêmement lente. Cependant, s'il est probable qu'un pourcentage élevé de la valeur limite a été atteint, on ne saurait l'affirmer en toute certitude.

Les résultats indiqués au tableau 8 sont la moyenne de deux déterminations, différant entre elles de moins de 3 p. 100 en ce qui concerne P total et P isotopiquement échangeable. Dans les sols peu enrichis, les erreurs relatives sur les accroissements et sur les rapports $\Delta P_{te}/\Delta P_t$ peuvent être importantes.

TABLEAU 8

*Rapport $\Delta P_{ie}/\Delta P_t$ en divers sols enrichis en P par le superphosphate*

$P_{ie}$ : P isotopiquement échangé après 20 alternances de dessiccation et d'humectation
$P_t$ : P total

| Origine du sol | Nature du sol | Calcaire en % | pH | Période considérée | P total initial par million | P apporté en kg/ha et par an | $\Delta$P total par million | $P_{ie}$ initial par million | $\Delta P_{ie}$ par million | $\frac{\Delta P_{ie}}{\Delta P_t}$ en % | Fraction apparem. fixée en % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Presle, Aisne | Limon argileux cultivé | 0,2 | 7,0 | 1960-66 | 480 | 36 | 80 | 125 | 45 | 56 | 44 |
| Menneville, Aisne | Sur craie cultivé | 39,4 | 8,5 | 1956-64<br>1965-66 | 1 120 | 43<br>22 | 80 | 75 | 3 | 4 | 96 |
| Bucy, Aisne | Limon des plateaux cultivé | 0,6 | 8,2 | 1956-64<br>1965-66 | 560 | 43<br>22 | 80 | 75 | 19 | 24 | 76 |
| Montfavet, Vaucluse | Argilo-calcaire rizière | 40 | 8,3 | 1957-67 | 766 | 80 | 234 | 115 | 23 | 10 | 90 |
| 48 parcelles, Versailles | Limon sans cultures puis cultivé | 0 | 6,0 | 1961-65<br>1965-66 | 630 | 83 | 85 | 140 | 80 | 94 | 6 |
| 42 parcelles, Versailles | Limon sans cultures | 0 | 6,0 | 1930-65 | 384 | 70 | 248 | 73 | 143 | 58 | 42 |
| La Queue-les-Yvelines | Limon cultivé | 0 | 7,0 | 1946-57 | 370 | | 31 | 112 (2) | 21 | 68 | 32 |

(2) $P_{ie}$ par agitation prolongée dans l'eau.

Les valeurs indiquées pour $\Delta P_{ie}$ diffèrent peu de celles mesurées après agitation prolongée d'une suspension aqueuse.

Dans les sols normalement cultivés, P organique a très peu varié, ce à quoi on pouvait s'attendre, étant donné que dans les sols soumis depuis longtemps à un même système cultural, un régime stationnaire s'établit par compensation des gains et des pertes des divers constituants organiques. Dans le terrain de Versailles, maintenu sans culture, P organique a beaucoup diminué, de l'ordre de 0,75 p. 100 par an si l'on admet une décroissance exponentielle (FARDEAU et MARINI, 1970), valeur qui ne diffère pas tellement de celle observée pour le carbone (SIMON-SYLVESTRE, 1964).

Dans les deux sols calcaires étudiés, Menneville et Montfavet, la quasi-totalité, 96 et 90 p. 100 des phosphates solubles incorporés a été fixée sous forme non isotopiquement échangeable dans les conditions décrites. Ce résultat est en accord avec le fait que les phosphates calciques précipités en milieu basique (pH > 7,6, SCHOEN *et al.*, 1954) ou au contact de grains calcaires (ARVIEUX, 1967) se transforment irréversiblement en phosphate apatitiques, dont le produit de solubilité est inférieur au produit des activités ioniques ayant provoqué la précipitation initiale. L'importance de la fixation observée suggère que l'agriculteur devrait éviter dans la mesure du possible d'investir dans un sol calcaire un large capital de phosphate, avec l'espoir que cela lui permettrait par la suite de se limiter à des doses de restitution.

Dans le sol à peine calcaire, mais basique, de Bucy, la fixation observée, quoiqu'encore très importante, ne comporte pas nécessairement des conséquences fâcheuses ; nous confirmerons en effet au prochain paragraphe que dans des sols non calcaires, même basiques, des racines ont la faculté de dissoudre des phosphates apatitiques naturels finement pulvérisés.

Dans les autres sols, neutres ou légèrement acides, la fraction fixée des reliquats d'engrais phosphatés, quoique moins importante que dans les cas précédents, est encore élevée, puisqu'elle atteint le tiers ou la moitié des phosphates investis, si l'on excepte les 48 parcelles de Versailles, dont le $\Delta P_t$ est trop petit pour être mesuré avec une précision acceptable.

Dans le sol des 42 parcelles de Versailles, le phosphore organique a diminué de 65 mg par kg ; $\Delta P_t$ doit être augmenté de la même quantité pour représenter l'accroissement de P minéral, ce qui porte ce dernier à 248 + 65 = 313 mg par kg. La fraction isotopiquement échangeable de cet accroissement se trouve ainsi ramenée à 46 p. 100. Ces résultats confirment ceux obtenus antérieurement par l'un de nous (BARBIER, BILAUS, BONIFACE, 1965).

En résumé, l'étude cinétique de l'échange isotopique des ions-phosphate du sol, poursuivi jusqu'à une limite au moins apparente, apporte un argument sérieux en faveur de la possibilité d'une fixation irréversible de $PO^{---}$ appliqué sous forme d'engrais solubles, même en sol ni calcaire ni franchement acide.

Faut-il en déduire qu'en cas de bilan nul du phosphore total, l'activité thermodynamique des ions $PO_4^{---}$ pourrait diminuer d'année en année, auquel cas il serait nécessaire de fournir toujours plus de phosphore que les récoltes et l'eau d'infiltration n'en exportent, pour maintenir cette activité à son niveau actuel ? Une telle conclusion serait à notre avis prématurée, pour plusieurs raisons :

1° Il sera confirmé au chapitre suivant que les racines ont la faculté d'attaquer des composés phosphorés minéraux ou organiques dont P n'est actuellement pas diffusible.

2° Il convient de noter que les fixations constatées concernent des sols que l'on enrichit en $PO_4^{---}$. Or, en ce qui concerne un autre ion, le potassium, il est établi que sa fixation est la conséquence d'un enrichissement du sol en cet élément, et qu'au contraire, l'appauvrissement du sol en K provoque une libération de K (GARAUDEAUX *et al.*, 1968).

3° Une fraction de P appliqué pourrait être séquestrée dans des pores internes, après fermeture de ceux-ci par dépôt de gels devenant imperméables par dessiccation, mais altérables par des agents chimiques ou biochimiques. Ces gels pourraient être des humates calciques, connus pour leur rôle antimouillant, et d'ailleurs faiblement ionisés (JACQUIN et SAAS, 1965), ou des hydroxydes de fer chélatables par les excreta rhizosphériques.

En définitive, le problème crucial de la fixation des phosphates dans le sol et de ses conséquences pour l'alimentation phosphorée des cultures, nous semble loin d'être résolu. Des recherches concernant l'action des racines ou des petits animaux du sol sur la fraction fixée d'engrais phosphatés anciennement enterrés, nous paraissent susceptibles de hâter la solution de ce problème.

## B. — ATTAQUE DE COMPOSÉS PHOSPHORÉS DU SOL PAR LES RACINES

Cette recherche exige absolument l'emploi d'un isotope du phosphore naturel ; c'est en effet la seule façon de discerner P originaire des composés étudiés de P originaire du sol. On pourrait objecter qu'il suffirait d'opérer en milieu artificiel ne contenant pas d'autre source de phosphore que les composés en question. Mais la dissolution de phosphates minéraux dépend de l'activité des ions-phosphate dans le milieu, et l'hydrolyse de composés phosphorylés en dépend vraisemblablement aussi (voir ci-dessus action inhibitrice de $PO_4^{--}$ à l'égard de la phytase).

### 1. — *Phytine*

Une publication antérieure a décrit en détail des recherches sur l'hydrolyse de la phytine dans la rhizosphère (FARDEAU, DELILLE et ABRAMOVICI, 1968). Nous les résumons ici comme exemple d'application de la méthode de démarquage ; l'interprétation des résultats sera présentée sous une forme différente de celle adoptée précédemment.

Il est difficile d'obtenir de la phytine uniformément marquée sur P. On a donc utilisé de la phytine à $^{31}P$, que l'on a mélangée avec un sol dont $PO_4^{---}$ diffusible avait été préalablement marqué par $^{32}PO_4^{---}$ sans entraîneur, selon la méthode décrite plus haut.

Il a d'abord été vérifié que P de la phytine ne s'échange pas contre P des ions-phosphate en milieu stérile, même en 1 mois.

La phytine a été ajoutée à l'état de phytate de sodium, à raison de 150 mg P par vase de culture contenant 200 g d'un sol argilo-calcaire.

On a semé du ray-grass italien, dont on a récolté 4 coupes mensuelles successives. On y a dosé le phosphore et la radioactivité. Le sol a été homogénéisé après culture et mis en suspension dans l'eau. On a déterminé la radioactivité spécifique de $PO_4^{---}$ en solution après une nouvelle addition de $^{32}PO_4^{---}$. Les essais ont comporté 10 répétitions.

Les résultats présentés au tableau 10 montrent que l'absorption du phosphore par le ray-grass a été largement augmentée par l'addition de phytine, si l'on excepte

la première coupe, dans laquelle P des graines a interféré avec P du milieu.

Il est peu probable que ce prélèvement supplémentaire de phosphore soit la conséquence d'une absorption de phytine en nature. D'après SZEMBLER (1960), les racines de radis et d'orge n'absorbent P de la phytine qu'après son hydrolyse par les enzymes qu'elles excrètent. D'ailleurs, dans notre expérience, $PO_4^{---}$ isotopiquement échangeable du sol a augmenté en présence de phytine (tabl. 9).

TABLEAU 9

*$PO_4^{---}$ isotopiquement échangeable du sol*
(mg P par pot de 200 g)

| Initialement, sans phytine | Après 2 mois d'incubation en vases arrosés, sans plantes | | Après culture avec phytine |
|---|---|---|---|
| | Sans phytine | Avec phytine | |
| 6,2 | 6,4 | 9,2* | 8,4* |

* Excès sur le témoin significatif au seuil 0,01.

Cet accroissement de $PO_4^{---}$ diffusible du milieu suffit à expliquer l'absorption supplémentaire de P par le ray-grass.

Une difficulté, qui se présente couramment dans l'emploi d'isotopes comme indicateurs d'origine, réside dans l'éventualité d'échanges isotopiques parasites. La dilution de $^{32}PO_4^{---}$ du sol par les $^{31}PO_4^{---}$ de la phytine peut avoir deux causes :

— une hydrolyse de la phytine, qui libère des $PO_4^{---}$ s'ajoutant aux $PO_4^{---}$ diffusibles préexistants — c'est que nous cherchons à évaluer ;

— un échange de P de $PO_4^{---}$ du sol contre P de la fraction de la phytine non encore hydrolysée, échange qui ne modifie pas $PO_4^{---}$ du milieu. Nous avons constaté, en effet, que la fraction non hydrolysée de la phytine se marque en milieu non stérile.

Nous nous sommes donc contentés de déterminer en bloc la phytine transformée : somme de la phytine hydrolysée et de la phytine ayant subi l'échange isotopique. Il convient d'ailleurs de noter que cet échange isotopique prouve que les $PO_4^{---}$ de l'inositol lui sont réversiblement liés en présence de phytase, et qu'en conséquence ils peuvent être considérés comme assimilables au même titre que les $PO_4^{---}$ minéraux réversiblement adsorbés dans le sol.

Voici comment le calcul peut être conduit :

Les petites lettres $s$ et $\varphi$ en indice des symboles correspondent au phosphore originaire du sol ou de la phytine.

$r_s$ : radioactivité spécifique de P de la plante en l'absence de phytine.

$r_{s\varphi}$ : radioactivité spécifique de P de la plante en présence de phytine.

$P_s$ : phosphore de la plante originaire du sol en présence de phytine.

$P_\varphi$ : phosphore de la plante originaire de la phytine.

$P_{s\varphi}$ : phosphore total de la plante en présence de phytine.

TABLEAU 10

*Hydrolyse de la phytine dans le sol au contact de racines*

| Coupes | Dans les plantes — A : en présence de phytine — Phosphore prélevé mg P/pot | | Teneur en P % M. S. | | Activité spécifique de P des plantes coups/mn/µg P | | B : en l'absence de phytine — P originaire de la phytine — % de P tot. (α) | mg par pot | $^{32}P$ p. 1 000 de $^{32}P$ introduit | | Phosphore du système sol-plante isotopiquement dilué en mg/pot, d'après la composition isotopique : — de P des plantes (β) | | de P du sol homogénéisé | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | A | B | A | B | A | A | A | B | A | B | A | B |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) |
| $C_1$ ..... | 0,53 | 0,58 | 0,50 | 0,23 | 54 | 54 | | | 29 | 32 | | | | |
| $C_2$ ..... | 1,34 | 0,26 | 0,50 | 0,16 | 23 | 147 | 84 | 1,12 | 31 | 38 | 43,1 | 6,8 | | |
| $C_3$ ..... | 0,45 | 0,10 | | | 11 | 161 | 93 | 0,41 | 5 | 16 | 89,2 | 6,2 | | |
| $C_4$ ..... | 0,37 | 0,08 | 0,32 | 0,12 | 14 | 168 | 91 | 0,335 | 5,4 | 14 | 68,0 | 5,9 | | |
| Après culture | | | | | | | | | | | | | 8,4 | |
| Sans culture après 2 mois d'incubation | | | | | | | | | | | | | 9,2 | 6,4 |

(α) $\frac{r_s - r_{s\varphi}}{r_s} \times 100$ (voir texte).

(β) Quotient, multiplié par 1 000, des nombres des col. (1) et (2) par ceux des col. (9) et (10) respectivement.

On peut considérer que P originaire du sol a la même radioactivité spécifique en présence et en l'absence de phytine ; on peut donc écrire :

$$r_{s\varphi} = \frac{P_s \times r_s}{P_{s\varphi}}$$

comme par ailleurs $P_{s\varphi} = P_s + P_\varphi$, on trouve

$$P_\varphi = P_{s\varphi} \frac{r_s - r_{s\varphi}}{r_s}$$

ce qui aboutit aux valeurs indiquées dans les colonnes (7) et (8) du tableau 10. La majeure partie de P de la plante, 84 à 93 p. 100, provient de la phytine dans notre expérience. Cependant P de la phytine a été relativement moins bien utilisé que P minéral diffusible préexistant, puisqu'il a été fourni 25 à 23 fois plus du premier que le sol ne contient du second (150 contre 6 ou 6,5). Les colonnes 11 et 12 du tableau indiquent P isotopiquement dilué dans l'ensemble sol + plante, calculé d'après la composition isotopique de P des plantes. En présence de phytine, les quantités trouvées dépassent de beaucoup, 5 à 10 fois, celles que l'on déduit de l'analyse de la solution du sol homogénéisé après culture. Il faut en conclure que l'action des racines sur la phytine est restée étroitement localisée dans la rhizosphère.

En résumé, l'hydrolyse de la phytine au contact des racines apparaît comme l'une des causes pour lesquelles le phosphore assimilable (ou devenant assimilable) d'un sol cultivé peut être notablement supérieur à celui qui se révèle diffusible en suspension aqueuse.

### 2. — *Phosphates calciques de type apatitique*

a) *Dispositif expérimental.*

Deux sols ont été utilisés, l'un argilo-calcaire, l'autre neutre, ayant les caractéristiques suivantes :

| | Sol A argilo-calcaire de Cadarache | Sol B neutre (boulbène) |
|---|---|---|
| Calcaire p. 100 ..... | 27 | 0 |
| pH..... | 8,0 | 6,95 |
| Argile $< 2\,\mu$ p. 100 ... | 8,29 | 18,5 |
| Mat. org. tot. p. 100 . | 1,5 | 3,268 |
| P total p. 1 000 .... | 0,895 | 0,52 |

Le phosphate calcique utilisé est un phosphate naturel de Gafsa, relativement tendre, finement pulvérisé (tamis 300) contenant 14,9 p. 100 de P total.

Le marquage a été réalisé de deux façons, comme il a été indiqué précédemment (Méthodologie, B).

D'une part, une solution en équilibre avec le sol, additionnée de $^{32}PO_4^{---}$ sans entraîneur, a été intimement mélangée au sol par arrosages successifs suivis chacun d'un brassage. Le volume total d'eau ajouté ne dépasse pas 100 ml par kg de terre sèche, ce qui laisse le sol meuble. Il a été vérifié par comptage de petits échantillons de 20 mg que le marquage ainsi obtenu est très homogène. La poudre de phosphate dans son état naturel ($^{31}P$) est ensuite intimement mélangée avec le sol.

D'autre part, la poudre de phosphate a été irradiée pendant 48 heures sous un flux de neutrons comme indiqué ci-dessus. Le phosphate radioactif obtenu a été mélangé à des échantillons de sol traités comme les précédents, mais sans $^{32}PO_4^{---}$.

b) *Résultats* (tabl. 11).

Voici le détail des calculs conduisant aux résultats du tableau 11, en ce qui concerne le sol neutre (boulbène). Ces calculs ont été effectués en supposant que la radioactivité spécifique du phosphore est uniforme dans la plante et dans $PO^{---}$ diffusible du sol.

*α) Sol à $PO_4^{---}$ diffusible marqué par $^{32}P$ + phosphate $^{31}P$.*

Le phosphore des plantes, divisé par la fraction passée dans la plante de la radioactivité totale introduite, donne par définition le phosphore isotopiquement dilué dans l'ensemble du système, soit pour la 2e coupe 223 mg P par kg en présence de phosphate, et 158 dans le témoin sans phosphate. Il s'est donc apparemment dissous 65 mg P du phosphate.

*β) Sol $^{31}P$ + phosphate irradié $^{32}P$.*

On peut écrire, en désignant par $\rho$ la radioactivité spécifique de P des plantes, et par $\rho_0$ la radioactivité spécifique de P du phosphate :

$$\rho = \frac{\text{P dissous du phosphate} \times \rho_0}{\text{P diffusible préexistant} + \text{P dissous du phosphate}}$$

En tenant compte de P diffusible préexistant déterminé dans l'expérience précédente, on trouve

$$\text{P dissous du phosphate} = \frac{158 \times 0{,}47}{1{,}68 - 0{,}47} = 61 \text{ mg}$$

Pour la 3e coupe, les deux méthodes ont donné respectivement 101 et 95 mg.

Les deux méthodes fournissent donc des résultats très concordants ; ce qui prouve, d'une part, que l'interversion des marques isotopiques n'a pas modifié les résultats, d'autre part, que l'irradiation du phosphate n'a pas sensiblement altéré sa solubilité.

Un autre exemple de la concordance entre les deux méthodes, concernant un phosphate soluble localisé dans le sol, sera décrit au paragraphe suivant.

D'après les résultats précédents, la quantité de phosphate dissoute au contact des racines dépasserait largement le supplément de P prélevé par les plantes. Cependant, ici comme dans l'expérience sur la phytine, il est possible que l'accroissement de P isotopiquement dilué calculé d'après l'analyse des plantes surestime la quantité de phosphate dissoute, du fait que la dilution de P du sol par P du phosphate resterait étroitement localisée au contact des racines. Cette difficulté d'interprétation des mesures a déjà été signalée autrefois par l'un de nous (BARBIER, 1957) qui avait constaté qu'après addition d'un phosphate calcique naturel, l'accroissement de P calculé comme isotopiquement dilué (d'après l'analyse des plantes) peut dépasser largement la quantité de phosphate incorporée.

Il faudrait, comme dans le cas de la phytine, mesurer la radioactivité spécifique de P dans la solution du sol homogénéisé après culture.

TABLEAU II

*Attaque d'un phosphate naturel calcique par des racines de ray-grass, en sol neutre* (boulbène)

| Coupes successives | Sol marqué par $^{32}P$ + phosphate $^{31}P$ | | | | | | | Sol $^{31}P$ + phosphate marqué $^{32}P$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A : en présence de phosphate | | | B : témoin sans phosphate | | | | | | |
| | P prélevé par ray-grass (mg/kg) | | Fraction de la radioactivité prélevée par ray-grass en % | | P isotopiquement dilué d'après analyse du ray-grass (mg/kg) | | Phosphate apparemment dissous par différence | Radioactivité spécifique de P du phosphate | Radioactivité spécifique de P du ray-grass | Phosphate apparemment dissous (mg P/pot) (voir texte) |
| | A | B | A | B | A | B | | | | |
| $C_2$ ..... | 13,16 | 7,8 | 5,8 | 4,9 | 223 | 158 | 65 | 1,68 | 0,47 | 61 |
| $C_3$ ..... | 15,53 | 7,4 | 5,6 | 4,3 | 275 | 174 | 101 | 1,68 | 0,59 | 95 |

Dans un sol calcaire, les mêmes expériences ont montré que la dissolution du phosphate naturel a été pratiquement nulle.

Il serait prématuré d'en conclure que les racines d'aucune culture n'attaquent aucunement en sol calcaire les phosphates basiques qui se forment au contact de particules d'engrais phosphatés solubles, étant donné que ces phosphates résiduels peuvent avoir une structure différente de celle des minerais de phosphates calciques.

Par ailleurs, au début de l'évolution pédologique d'une roche mère calcaire, les premières plantes installées ont bien dû tirer du phosphore des phosphates basiques qui s'y trouvent. Mais il est conforme aux lois de la dissolution que des phosphates d'espèce donnée soient attaqués dans un milieu où le niveau d'activité $PO_4^{---}$ est bas, et ne le soient pas à un niveau plus élevé, notamment au niveau assurant l'optimum de nutrition phosphorée des cultures.

Ces recherches sur la dissolution de phosphates par les racines sont illustrées par des observations autohistoradiographiques de KHAU VAN KIEN (1966). Ce chercheur s'est proposé d'observer directement l'association des radicelles et des particules de terre, sur des coupes minces obtenues au cryotome après congélation du sol enraciné. La présence de gros grains durs interdisant les coupes au rasoir, des milieux artificiels ont été préparés par incorporation de ciments organiques (gélatine, blanose) à des matériaux très fins, de manière à leur conférer une structure poreuse se rapprochant de celle des sols naturels. Un phosphate à $^{32}P$ a été soit mélangé à ces milieux, soit, plus souvent, déposé en solution sur des feuilles d'épinards repiqués. Les microautoradiographies de très nombreuses coupes (dont certaines publiées, KHAU VAN KIEN, 1966) permettent d'observer la diffusion ou les transferts de $^{32}P$ à l'extérieur ou à l'intérieur des racines. P d'un phosphate calcique naturel irradié a diffusé au contact des racines en sol basique non calcaire, mais non en leur absence.

### C. — ALIMENTATION DES PLANTES EN MILIEU HÉTÉROGÈNE QUANT A LA CONCENTRATION DES IONS $PO_4^{---}$ DIFFUSIBLES

Lorsqu'un engrais pulvérulent ou granulé a été épandu à la surface du sol puis enterré par un labour, il reste en majeure partie localisé entre les tranches successives du labour, même après hersage. S'il est soluble, ses ions adsorbables par les colloïdes du sol demeurent concentrés à la surface des mottes. Il en résulte une forte hétérogénéité de distribution des ions diffusibles, même lorsque l'engrais n'a pas été intentionnellement localisé par une machine appropriée.

Si l'un des éléments de l'engrais a été marqué par un isotope radioactif, il est en principe possible d'évaluer la quantité de cet élément prélevée par la plante sur l'engrais, en divisant la radioactivité totale de la plante par la radioactivité spécifique de l'engrais. La quantité prélevée sur le stock initial du sol est évaluée par différence.

D'après FRIED et DEAN (1952), cette technique permet de définir l'efficacité du phosphore du sol par rapport à celle d'un engrais pris comme standard, selon la formule :

$$\frac{A}{\text{P de l'engrais}} = \frac{\text{P originaire du sol}}{\text{P originaire de l'engrais}} \text{ (dans la plante)}$$

où A représente le phosphore du sol exprimé en équivalents d'engrais. Divers auteurs, STRZIEMENSKI (1953), SCOTT RUSSEL (1954), ont explicité cette formule :

$$\frac{\text{P originaire du sol}}{\text{P originaire de l'engrais}} = \frac{\text{A}}{\text{P engrais}} \times \frac{\text{assimilabilité de l'unité P sol}}{\text{assimilabilité de l'unité P engrais}}$$

Le 3e rapport pourrait être calculé si le 2e avait été déterminé séparément. Voici à cet égard une ancienne expérience de l'un de nous (BARBIER, 1957) que nous rapportons ici avec un complément de discussion.

Dans des vases pour cultures, on a superposé 3 couches d'une même terre ; la couche intermédiaire, représentant 1/2, 1/4 ou 1/8 du poids total (1 kg) avait été au préalable intimement mélangée avec un phosphate potassique radioactif (50 mg $P_2O_5$). La terre provient d'un sous-sol de limon contenant 50 mg $P_2O_5$ isotopiquement diluable en suspension aqueuse par kg, valeur voisine de celle déterminée par dilution isotopique en présence de plantes (série I).

Dans une autre série (série II), on a inversé les marques isotopiques : on a incorporé à la couche intermédiaire du phosphate potassique non radioactif et l'on a mélangé avec les deux couches extrêmes $^{32}PO_4^{---}$ sans entraîneur.

On a cultivé des tomates dans tous les vases.

Voici d'abord les poids de matière sèche récoltée en valeurs relatives (tabl. 12) :

TABLEAU 12

*Influence de la localisation d'un phosphate soluble sur l'alimentation P de tomate*

| | Poids des plantes | | $P_2O_5$ prélevé | |
|---|---|---|---|---|
| Age des plantes en jours | 16 | 21 | 16 | 21 |
| Rapport de localisation : | | | | |
| 1/1 (répartition uniforme) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1/2 | 135 | 184 | 111 | 189 |
| 1/4 | 167 | 221 | 172 | 226 |
| 1/8 | 203 | 270 | 308 | 362 |

L'alimentation phosphatée et la végétation des tomates ont été largement favorisées par la localisation de l'engrais, comme connu, et d'autant plus que l'engrais a été localisé dans une plus petite fraction du sol.

Dans le tableau suivant, 13, la lettre C désigne la couche intermédiaire, enrichie en P ; la lettre *c* désigne l'ensemble des deux couches extrêmes, ne contenant que le phosphore natif.

La radioactivité spécifique de P du compartiment à $^{32}P$ a été calculée en divisant la radioactivité introduite par la somme de P soluble incorporé et de P diffusible préexistant (série I) ou par P diffusible préexistant (série II).

Les deux séries de mesures concernant *c* peuvent être considérées comme concordantes, puisqu'elles ont été obtenues par différence entre deux nombres voisins dans la série I, et directement dans la série II.

Le tableau 13 montre que le rapport, dans les plantes, de P originaire du compartiment à engrais à P originaire du compartiment sans engrais, est toujours très supérieur au rapport des quantités de P diffusible initialement présentes dans chacun ;

les quotients de ces deux rapports, qui mesurent l'inverse du 3e rapport de la dernière formule citée, sont indiqués dans la dernière colonne du tableau. Or ces quotients n'augmentent pas systématiquement avec l'étroitesse de la localisation, et en tout cas relativement beaucoup moins que le phosphore prélevé par les plantes. La raison de ces résultats apparemment contradictoires est vraisemblablement le fait que la quantité de racines du compartiment enrichi en P diminue en même temps que son volume, ce qui peut compenser un accroissement de l'assimilabilité de l'unité P engrais par unité de surface absorbante racinaire.

TABLEAU 13

*Alimentation phosphorée de tomates en présence d'un phosphate soluble localisé*

Série I : engrais phosphaté radioactif

Série II : phosphate du sol radioactif

Série I (21 jours)

| Rapport de localisation | mg $P_2O_5$ dans les parties aériennes | | | Rapports | | Quotients des deux rapports ci-contre |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_2O_5$ total | $P_2O_5$ originaire de C | $P_2O_5$ originaire de *c* (par différence) | des nombres des deux colonnes précédentes (C/*c*) | des masses initiales de $P_2O_5$ diffusible (C/*c*) | |
| 1/2 | 4,88 | 4,37 | 0,51 | 8,5 | 3 | 2,83 |
| 1/4 | 10,00 | 9,05 | 0,95 | 9,5 | 1,67 | 5,7 |
| 1/8 | 11,55 | 9,4 | 2,15 | 4,37 | 1,29 | 3,4 |

Série II (21 jours)

| Rapport de localisation | | $P_2O_5$ total | $P_2O_5$ originaire de *c* | $P_2O_5$ originaire de C (par différence) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_2O_5$ | Radio-activité | | | | | | |
| 1/2 | 1/2 | 6,75 | 0,4 | 6,35 | 15,9 | 3 | 5,3 |
| 1/4 | 3/4 | 8,08 | 0,65 | 7,43 | 11,5 | 1,67 | 6,9 |
| 1/8 | 7/8 | 12,92 | 1,96 | 10,96 | 5,5 | 1,29 | 4,3 |

En définitive, l'effet de la localisation d'un phosphate soluble sur le flux d'ions $PO_4^{---}$ pénétrant dans l'unité de surface racinaire peut être supérieure à celui évalué par la méthode isotopique décrite.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

1. Nos recherches sur l'autodiffusion d'ions-phosphate anciennement enterrés tendent à confirmer qu'une fraction importante des phosphates solubles incorporés dans le sol y subit une fixation irréversible, même en sol ni calcaire ni franchement acide. Dans des échantillons de sols provenant de champs d'expériences permanents, neutres ou légèrement acides, la limite apparente de la dilution isotopique des reliquats de superphosphate, atteinte après 20 alternances de dessiccation et d'humectation, ne dépasse pas en général 50 ou 80 p. 100 environ.

2. Cependant ce fait n'autorise pas à conclure qu'il est nécessaire d'enrichir indéfiniment le sol en phosphore total, pour maintenir optimale l'alimentation des plantes en cet élément, et cela pour différentes raisons :

— incertitude sur la limite de la dilution isotopique ;

— possibilité de libération, sous l'action des racines, des microorganismes (TARDIEUX-ROCHE, 1966) ou des petits animaux, d'ions-phosphate temporairement bloqués.

— le fait que les fixations irréversibles observées concernent des sols que l'on enrichit régulièrement en phosphate ; de telles fixations n'ont pas été constatées à notre connaissance dans des sols en voie d'appauvrissement (sols non calcaires) ;

— le fait que la fraction restée libre des phosphates incorporés et la fraction fixée augmentent parallèlement au fur et à mesure que le sol s'enrichit, ce qui tend à prouver que des équilibres finissent par s'établir, éventuellement par étapes, sous l'action des plantes entre les fractions fixée et libre (sols neutres ou peu acides).

3. Un progrès important pourrait sans doute être accompli grâce à des expériences analogues à celles réalisées pour le potassium, par GARAUDEAUX *et al.*, notamment (1968) : cultiver en vases plusieurs plantes successivement, avec apport de phosphates solubles à doses variables, de telle sorte que le bilan final du phosphore total varie largement, de fortement positif à fortement négatif ; rechercher ensuite si $P_{ie}$ (phosphate isotopiquement échangeable) varie moins vite que P total ; si l'on constatait que $P_{ie}$ augmente moins que P total en cas de bilan positif, mais qu'il diminue moins que P total en cas de bilan négatif, ce serait la preuve que des équilibres s'établissent en sol cultivé entre les formes fixée et libre.

4. Le problème-clé de la fixation des phosphates dans le sol et de ses conséquences pour la nutrition des cultures ne nous paraît donc pas résolu. C'est sans doute la raison pour laquelle il n'a pas encore été possible de formuler des directives générales pour la planification des fumures phosphatées. Des solutions précises ne sauraient être considérées comme sans intérêt. Dans des entreprises agricoles où les marges bénéficiaires ne dépassent pas 10 p. 100, on ne saurait négliger une différence de rendement de 2 p. 100 pour un seul facteur de nutrition. En raison du manque de précision des essais culturaux, des recherches de laboratoire approfondies sur l'évolution des phosphates dans le sol, par des méthodes chimiques, isotopiques et physiologiques (action des racines) nous paraissent indispensables pour progresser.

5. Dans des sols calcaires, la fraction isotopiquement diluée des reliquats de phosphates solubles après 20 alternances de dessiccation et d'humectation (ou après

agitation prolongée jusqu'à une apparente limite) a été trouvée très petite : 4 et 10 p. 100. De plus des phosphates naturels de type apatitique n'ont pas été attaqués par des racines de ray-grass, contrairement à ce qui a été observée en sol non calcaire. Ici encore on ne saurait conclure en toute certitude que les phosphates calciques-basiques qui se forment en sol calcaire à partir de phosphates solubles, ne sont aucunement attaqués par les racines d'aucune plante. Une expérience utile consisterait à comparer l'action de racines sur la dilution isotopique de $PO_i^{---}$ dans les parcelles phosphatées et les parcelles témoin de champs d'expériences anciens.

6. Ainsi le phosphore radioactif, bien que déjà utilisé dans d'innombrables recherches, peut encore rendre des services éminents. En dehors des questions d'ordre général qui viennent d'être évoquées, il aiderait à résoudre des problèmes particuliers, parmi lesquels on peut citer comme exemple une question controversée : l'emploi des scories de déphosphoration en terre calcaire.

*Reçu pour publication en février 1971.*

## SUMMARY

### ON THE DIFFUSIBILITY OF PHOSPHATE IONS IN SOIL

This paper is mainly concerned with the self-diffusion of phosphate ions, accumulated in soil through fertilizer residue during previous decades.

A methodological chapter treats with errors of interpretation resulting from the application of the isotopic dilution theory to P atom groups (soil or soil + plant), whose isotopic composition is far from uniform. The validity of the method of isotopic measurement was confirmed by agreement with results obtained by the inversion of isotopic marks of two sources of phosphorus.

Based on soil samples obtained from fields that had been under cultivation for a very long time, experiments confirmed that a large portion of long-buried phosphate ions were no longer isotopically exchangeable (in a period compatible with that of $^{32}P$).

Apparently, at the limit of isotopic dilution, the ratio $\Delta P_{ie}/\Delta P_t$ representing increases in isotopically exchangeable $PO_4$ and total mineral $PO_4$, does not exceed 10 p. 100 in the calcareous soils under study. Even in soils which are neither calcareous nor clearly acid, this ratio cannot exceed 50 p. 100.

Nevertheless, it would be premature to conclude that the maintenance of the present level of chemical activity of $PO_4$ ions requires soil enrichment in P for an indefinite period. In effect, we confirmed the ability of plant roots to release $PO_4$ from solid, organic or mineral compounds, especially from basic calcium phosphates. An apatite phosphate from Gafsa was attacked by rye-grass roots even in basic soil, but not in calcareous soil.

The paper ends by discussing an experiment on plant nutrition in P in a heterogeneous environment, in relation to the concentration of diffusible $PO_4$.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ÜBER DAS DIFFUSIONSVERMÖGEN DER PHOSPHATIONEN DES BODENS

In dieser Arbeit handelt es sich im Wesentlichen um die Autodiffusion von Phosphationen, die sich im Boden durch Düngerrückstände im Laufe früherer Jahrzehnte anhäuften.

In einem methodologischen Abschnitt werden die Interpretationsirrtümer behandelt, die sich aus der Anwendung der Formel der isotopischen Verdünnung auf Atomzusammenfügungen P (Boden oder Boden + Päanze) ergeben, welche eine sehr ungleichmässige isotopische Zusammensetzung aufweisen. Die Gültigkeit der isotopischen Messverfahren wurde durch die mittels Vertauschung der isotopischen Marken von zwei Phosphorquellen übereinstimmend erhaltenen Ergebnisse bestätigt.

Die Untersuchung von Bodenstichproben aus langjährigen Feldversuchen bestätigte, dass ein beträchtlicher Bruchteil von früher eingebrachten Phosphationen gegenwärtig (in einer mit der Periode $^{32}P$ verträglichen Zeit) nicht isotopisch austauschbar ist. An der — wenigstens scheinbaren — Grenze der isotopischen Verdünnung, übertrifft in den untersuchten Kalkböden das Verhältnis $\Delta P_{te}/\Delta P_t$, der isotopisch austauschbaren $PO_4$ — Zunahmen zu der totalen Menge an mineralischen $PO_4$, nicht 10 p. 100. Selbst in den weder Kalkhaltigen, noch rein saueren Böden, kann dieses Verhältnis 50 p. 100 nicht übertreffen.

Es würde jedoch verfrüht sein, daraus zu schliessen, dass eine unbegrenzte Anreicherung des Bodens an totalem P notwendig sei, um die chemische Aktivität der $PO_4$ Ionen auf der Höhe des gegenwärtigen Niveaus zu erhalten. Wir haben schon bestätigt, dass die Wurseln der Pflanzen imstande sind, $PO_4$ von festen, organischen oder mineralischen Verbindungen, und namentlich von basischen, kalkigen Phosphaten zu befreien. Ein apatitisches Phosphat aus Gafsa wurde durch Raygras-wurzeln selbst im basischen Boden, aber nicht im kalkigen Boden angegriffen.

Abschliessend wird ein Versuch über die P-Versorgung der Pflanzen in heterogenem Milieu hinsichtlich der Konzentration in diffusionsfähigem $PO_4$ diskutiert.

## РЕЗЮМЕ

*О способности почвенных фосфат-ионов к диффузии.*

Г. БАРБЬЕ, Ж. К. ФАРДО, П. МАРИНИ при техническом сотрудничестве Жоселины ЖАПП.

Данная заметка относится главным образом к автодиффузии фосфат-ионов накопившихся в почве в течении предидущих десятилетий. от остатков удобрений.

В методологической части работы разбираются, в частности, ошибки интерпретации вытекающие из применения формулы изотопного разбавления к совокупности атомов P (почва, или почва + растение), изотопический состав которых далеко не одинаков. Законность применения приема изотопных измерений подтверждается согласованностью результатов полученных при взаимообмене изотопической метки двумя различными источниками фосфора.

Изучение образцов взятых с поля на котором производился длительный опыт, подтвердило что крупная фракция фосфат-ионов, внесенных в почву очень давно, неспособна в настоящее время к изотопному обмену (в течении времени соотвествующему периоду $P^{32}$). На границе, во всяком случае видимой границе, изотопного разбавления, соотношение $\Delta P_{ie}/\Delta P_r$, увеличений количеств изотопнически-обменного $PO_4$ и общего минерального $PO_4$, не превышают 10 % в изучавшихся известковых почвах. И даже в почвах ни известковых, ни просто кислых, это соотношение не может превысить 50 %.

Однако, было-бы преждевременным заключить, что необходимо бесконечно обогащать почвы обшим P чтобы иметь возможность поддержать на теперешнем уровне химическую активность ионов $PO_4$. Ибо мы получили подтверждение что корни растений способны освобождать $PO_4$ твердых органических и минеральных соединений, в частности основных известковых фосфатов. Апатитовый фосфат из Гафсы атаковался корнями рай-грасса даже в основной почве, но не в почве известковой.

Заметка заканчивается обсуждением опыта фосфорного питания растений в гетерогенной, в смысле концентрации способного к диффузии $PO_4$, среде.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ARVIEUX J.-C., 1967. *Évolution des phosphates solubles en présence de $CO_3Ca$: formation de phosphates calciques apatitiques.* D. E. S., Faculté de Nice.

ATTOE O.-J., 1946. Potassium fixation and release in soils occuring under moist and drying conditions. *Soil Sci. Am. Proc.*, **11**, 145-149.

BARBIER G., QUILLON E., 1954. Étude au moyen d'isotopes de la dissolution des phosphates peu solubles en présence d'un échangeur d'anions. *Ann. agron.*, (5), 775-777.

BARBIER G., TYSZKIEWICZ E., 1954. Extension par dessiccation de l'autodiffusion des ions phosphoriques dans le sol. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **238**, 1908-1910.

BARBIER G., CHABANNES J., 1955. Sur la rétention du bore dans les sols et ses conséquences agronomiques. *C. R. Acad. Agri. Fr.*, 259-263.

BARBIER G., 1956. Étude avec l'aide de $^{32}P$ du mode d'action et d'arrière action à long terme des engrais phosphatés. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **42**, 240-243.

BARBIER G., LESAINT C., QUILLON P., 1957. Sur la dissolution des phosphates peu solubles dans le sol, étudiée par dilution isotopique. *Agrochimica*, **1**, 210-222.

BARBIER G., BILAUS J., BONIFACE R., 1965. Contribution à l'étude de l'influence du pH sur la mobilité des ions phosphoriques du sol. *Ann agron.*, **16**, 6, 603-622.

BLANCHET R., 1958. Cinétiques des échanges isotopiques et énergie de liaison des ions $PO_4$ dans le sol. *Verhandlungen der II. und IV. Kommission der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft.*, Hamburg, II, 214-219.

BIANCHETTI R., SARTIRANA M. L., 1967. The mecanism of the repression by inorganic phosphate of phytase synthesis in the germinating wheat embryo. *Biochim. biophys. Acta*, **145** (2), 485-490.

BLACK C.-A., 1965. *Method of soil analysis*, Part 2, 1035-1049.

BOLT G.-H., 1955. Ion absorption by clays. *Soil Sci.*, **79**, 267-275.

CHAMINADE R., 1936. La rétrogradation du potassium dans les sols. *Ann. agron.*, **6**, 818-830.

FARDEAU J.-C., MARINI P., 1967. Sur la détermination des cinétiques d'échange isotopique des ions phosphate d'un sol. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **267**, 324-327, Série D.

FARDEAU J.-C., MARINI P., 1967. Détermination, par échange isotopique en retour, du compartiment des ions phosphates les plus mobiles du sol. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **267**, Série D, 427-430.

FARDEAU J.-C., *et al.*, 1968. Utilisation de la phytine par les plantes. *Isotopes and radiation in soil organic matter studies*, 555-565.

FARDEAU J.-C., MICHEL J.-P., 1969. Extraction et dosage des ions-phosphate des solutions de sol. *Ann. agron.*, **20** (6), 645-648.

FARDEAU J.-C., MARINI P., 1971. Étude par échange isotopique de la transformation dans un sol sans végétation de divers engrais phosphatés après 35 applications annuelles. *Ann. agron.*, **22** (1), 113-125.

FLAIG W. *et al.*, 1960. The uptake of phosphorus from inositol hexaphosphate. *Landwirtsch. Forsch. Sonderheft.*, 14-43.

FRIED M., DEAN L. A., 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.*, **73**, 263-271.

GARAUDEAUX J., QUÉMÉNER J., 1968. Étude de la libération du potassium dans des cultures en pots. *9th. Inter. Cong. of Soil Sci.*, **11**, 639-647.

GERICKE S., 1954. Düngungsversuche mit radioactivem Thomasphosphat. *Phosphorsäure*, **14**, 199-218.

JACQUIN F., SAAS A., 1969. Étude à l'aide de radioisotopes des liaisons organo-minérales formées par les acides humiques et le calcium. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **261**, 489-491.

JACQUINOT L., 1964. Phosphatage de fond avec un phosphate naturel. *Agron. trop.*, **19**, 987-995.

KHAU VAN KIEN L., 1966. Étude autohistoradiographique de l'exsudation racinaire après absorption foliaire de phosphore 32. *Isotopes in plant nutrition and physiology*, 5-9 septembre 1966, 391-402.

LARSEN S., 1952. The use of $P^{32}$ in studies on the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, **4**, 1-10.

MARINI P., FARDEAU J.-C., 1970. Évolution du superphosphate anciennement enterré : mesure par échange isotopique. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **270**, série D, 3239-3242.

MATTSON S. *et al.*, 1951. Phosphate relationships of soil and plant. *Kungl. Lantbrukshögskolans Annaler*, **18**, 129-153.

RUSSEL R. S. *et al.*, 1954. Isotopic equilibria between phosphates in soil and their significance in the assessment of fertility by tracer methods. *J. Soil Sci.*, **5**, 85-105.

SAIDEL P., CERNESCU N., 1927. Neue Beiträge zu unserer Kenntniss von Erdbodenlösung. *Proc. of the Inter. Cong. of Soil Science*, Washington, 314.

SAUNDERS W. M. H., 1955. Observations of the determination of total organic phosphorus in soils. *J. Soil Sci.*, 6-2, 245-267.

SCHOEN U., BARBIER G., HÉNIN S., 1954. Sur l'évolution des phosphates calciques dans les conditions du sol. *C. R. Acad. Sci. Fr.*, **238**, 23, 2255-2257.

SIMON-SYLVESTRE G., 1964. Évolution comparée du soufre, de l'azote et du carbone pendant 30 ans dans un sol maintenu sans végétation. *V. Simposio Inter. di Agrochimica su lo Zolfo in agricoltora*, Palerme, 16-21 mars 1964, 163-169.

STANFORD G., 1957. A method of measuring short term nutrient absorption by plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 612-617.

STRZIEMENSKI K., 1953. Phosphate uptake studies with radioactive phosphorus. *New Zeal. J. Sci. Tech.*, **34** A, 496-506.

SZEMBER A., 1960. Influence on plant growth of the breakdown of organic phosphorus compounds by microorganisms. *Plant and Soil*, **13** (2), 147.

TARDIEUX-ROCHE A., 1966. *Contribution à l'étude des interactions entre phosphates naturels et microflore du sol.* Thèse Doc. Sci. Nat., Thèse nº 941, Fac. Sci. Paris.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (3), 343-361.

# RECHERCHES SUR LA RÉTROGRADATION DE L'ION AMMONIUM

R. CHAMINADE

avec la collaboration technique de Anne-Marie TABAREAU

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

Le phénomène de rétrogradation, ou passage à l'état non échangeable de l'ion $NH_4^+$, a été étudié dans la fraction argile d'un sol de limon et dans le sol lui-même. L'argile est constituée d'un mélange d'Illite, de Kaolinite et de Montmorillonite.

La rétrogradation est possible en milieu humide. Elle atteint alors 4 méq. pour 100 g d'argile. La dessiccation intensifie considérablement ce phénomène ; $NH_4$ rétrogradé peut atteindre après dessiccation 12 méq. pour 100 g d'argile ce qui représente environ le 1/3 de la capacité d'échange de l'argile.

La rétrogradation est relativement d'autant plus importante que les quantités de $NH_4$ sont plus faibles. Elle est presque totale, après dessiccation, pour des quantités inférieures à 5 méq. pour 100 g d'argile.

L'utilisation par les plantes de $NH_4$ rétrogradé a été étudiée par des essais de type Neubauer. Des cultures de Ray-grass ont été réalisées en présence de quantités identiques de sulfate d'ammonium. Dans l'une des séries d'essais, on a provoqué une rétrogradation maximum de $NH_4$ par dessiccation du sol après addition du sel ammoniacal. La rétrogradation s'est traduite par une diminution considérable du développement des plantes et de la quantité d'azote absorbé. Dans cet essai, l'ammonium rétrogradé n'a pas participé à la nutrition azotée du végétal.

Le sol étudié peut renfermer jusqu'à 2,7 méq. pour 100 g de $NH_4$ rétrogradé représentant plus de 1 000 kg N par hectare. Cette forme d'azote se retrouve dans le dosage de l'azote total par la méthode de Kjeldahl.

L'ion ammonium est, comme l'ion potassium, susceptible de passer de l'état échangeable à l'état non échangeable [1] (CHAMINADE, 1940).

Ce phénomène présente un grand intérêt théorique et d'importantes conséquences

[1] Pour désigner ce phénomène nous conserverons le terme de « rétrogradation » de préférence à la traduction littérale du terme anglais « fixation ». Il est en effet fréquent de parler de la « fixation d'un élément à l'état échangeable ». Le terme « rétrogradation » a d'ailleurs été admis dans le vocabulaire multilingue de la Science du Sol publié par la F. A. O. en 1954 sous la direction de G. V. JACKS.

pratiques. D'après PETERSBURGSKI et SMIRNOV (1964), beaucoup de sols peuvent fixer des quantités considérables d'ammonium sous forme non échangeable et ces quantités dépendent moins du type de sol que des modifications apportées par la fertilisation et la mise en culture. Le passage de l'ammonium à l'état non échangeable diminue son assimilabilité par les plantes et les bactéries et son aptitude à la nitrification.

GOUNY *et al.* (1960) étudiant la teneur en amonium rétrogradé des horizons d'un profil de sol lessivé acide ont montré que dans les horizons profonds, la presque totalité de l'azote dosé par la méthode Kjeldahl était représentée par de l'ammonium non échangeable.

De nombreux auteurs ont proposé des méthodes de détermination de l'ammonium rétrogradé (DHARIVAL et STEVENSON, 1958 ; BREMNER, 1959 ; SCHARTSCHABEL, 1961 ; MOGILEVKINA, 1964, 1969 ; RODRIGUES, 1964 ; SILVA et BREMNER, 1966 ; BREMNER *et al.*, 1967).

La difficulté de ce dosage réside dans la destruction préalable de la matière organique avant attaque du sol (attaque fluorhydrique ou Kjeldahl).

BREMNER *et al.* (1966) comparant les différentes méthodes proposées considèrent que les meilleurs résultats sont obtenus par destruction de la matière organique à chaud par l'hypobromite de potassium.

MOGILEVKINA (1964) préconise le chauffage du sol à 400° pendant 24 à 72 heures suivant la teneur en matière organique.

D'après BREMNER *et al.* (1967), cette technique peut amener des pertes d'ammonium rétrogradé. MOGILEVKINA (1969) est en désaccord avec BREMNER sur cette conclusion et considère que la méthode par ignition donne des résultats comparables à la méthode à l'hypobromite.

*Dans la première partie* de cette note seront exposées les recherches relatives à la mise en évidence du phénomène de rétrogradation dans l'argile isolée du sol, aux conditions dans lesquelles il se produit et aux conséquences qui en résultent, particulièrement en ce qui concerne la désorption par la chaleur.

*La seconde partie* sera consacrée à l'étude du phénomène dans le sol lui-même, notamment lorsqu'on apporte une fertilisation azotée sous forme de sels ammoniacaux.

## PREMIÈRE PARTIE

### *Matériel et techniques*

L'argile utilisée dans ces recherches a été extraite d'un sous-sol de limon par traitement préalable au carbonate de sodium, lavage et sédimentation 16 heures sur 20 cm.

Cette argile, analysée aux Rayons X se présente comme un mélange d'Illite, de Kaolinite et de Montmorillonite.

Pour détruire les traces de matière organique présentes dans l'argile sodique, celle-ci a été traitée au bain-marie à plusieurs reprises par de l'eau oxygénée à 110 volumes.

Malgré ces traitements, un Kjeldahl sur l'argile sodique donnait toujours des quantités non négligeables d'azote, de l'ordre de 5 méq. pour 100 g d'argile. Cet azote peut provenir de la présence dans l'échantillon initial d'une petite quantité d'ammonium rétrogradé et d'un reste de matière organique non détruite.

L'enrichissement de l'argile a été obtenu par traitement par une solution normale de $ClNH_4$ et lavage à l'eau jusqu'à disparition de $Cl^-$.

Les quantités d'ammonium fixées ont été déterminées par différence entre l'azote dosé par attaque Kjeldahl de l'argile $NH_4$ et de l'argile Na initiale.

L'ammonium échangeable est déplacé par une solution normale de ClK. Dans tous les cas, l'extraction est poursuivie jusqu'à ce que la solution percolée ne renferme plus de sels ammoniacaux.

La technique des courbes de désorption (CHAMINADE, 1965, 1968) a été utilisée pour l'étude de l'influence de la rétrogradation sur le comportement thermique de l'ion $NH_4^+$.

## I. — *Rétrogradation en milieu humide*

Des échantillons de 20 ml de suspension correspondant à 0,331 g d'argile Na ont été placés au contact de solutions de $ClNH_4$ de concentration croissante, le volume final étant amené à 50 ml.

Après 24 heures de contact, les suspensions ont été additionnées de KCl et l'extraction de l'ammonium échangeable ou non fixé a été poursuivie par lavage sur filtre.

Les résultats obtenus ont été les suivants :

méq. pour 100 g d'argile

| | $NH_4$ ajouté | $NH_4$ extrait par KCl | Diff. avec To (échantillon 1) | $NH_4$ rétrogradé |
|---|---|---|---|---|
| | — | — | — | — |
| 1 | 0 | 0,97 | 0 | 0 |
| 2 | 1,51 | 1,96 | 0,99 | 0,52 |
| 3 | 3,02 | 2,96 | 1,99 | 1,03 |
| 4 | 6,04 | 5,44 | 4,47 | 1,57 |
| 5 | 12,08 | 10,88 | 9,91 | 2,17 |
| 6 | 18,12 | 16,76 | 15,79 | 2,33 |
| 7 | 24,16 | 22,44 | 21,47 | 2,59 |
| 8 | 30,20 | 28,25 | 27.28 | 2,92 |
| 9 | 36,25 | 34,38 | 33,41 | 2,84 |
| 10 | 42,29 | 40,48 | 39,51 | 2,78 |
| 11 | 48,33 | 46,31 | 45,34 | 2,99 |
| 12 | 60,41 | 57,34 | 56,37 | 4,04 |

Dans tous les cas, la quantité d'ammonium retrouvée est inférieure à la quantité ajoutée. L'ammonium rétrogradé augmente régulièrement en fonction des quantités apportées et peut atteindre 4 méq. pour 100 g d'argile.

Les résultats précédents ne permettent pas de rapporter la rétrogradation à la quantité de $NH_4$ échangeable. Il s'établit en effet un équilibre entre le complexe absorbant et le cation $NH_4^+$ ajouté, ce dernier ne se fixant que partiellement à l'état échangeable. On peut toutefois supposer que, après addition de 60,4 méq. de $NH_4^+$ pour 100 g d'argile, l'argile est saturée en $NH_4^+$ et que la rétrogradation observée (4,04 méq./100 g) représente le maximum atteint en milieu humide.

## II. — *Rétrogradation après dessiccation*

La dessiccation de l'argile, après fixation de l'ion $NH_4$, intensifie fortement le phénomène de rétrogradation.

Un échantillon d'argile sodique a été centrifugé à cinq reprises, en présence d'une solution normale de $ClNH_4$, afin d'obtenir la saturation complète en $NH_4$. Il a été ensuite lavé à l'eau jusqu'à disparition totale de l'ion $Cl^-$.

L'ammonium échangeable a été extrait par une solution normale de KCl, d'une part sur la suspension d'argile non séchée et, d'autre part, sur la même argile après dessiccation à 100°. Voici les résultats obtenus (moyenne de 10 répétitions) :

| | méq. $NH_4^+$ échangeable pour 100 g d'argile |
|---|---|
| argile non séchée..... | 42,31 (variation de 42,1 à 42,4) |
| argile séchée ..... | 29,86 (variation de 29,5 à 30,2) |

La dessiccation a provoqué une chute de 12,45 méq. de $NH_4$ échangeable.

*Influence de la quantité de $NH_4$ fixé sur la rétrogradation.*

Les échantillons de suspension d'argile sodique ont été additionnés de quantités variables de chlorure d'ammonium puis centrifugés et lavés à l'eau jusqu'à disparition de la réaction de l'ion $Cl^-$

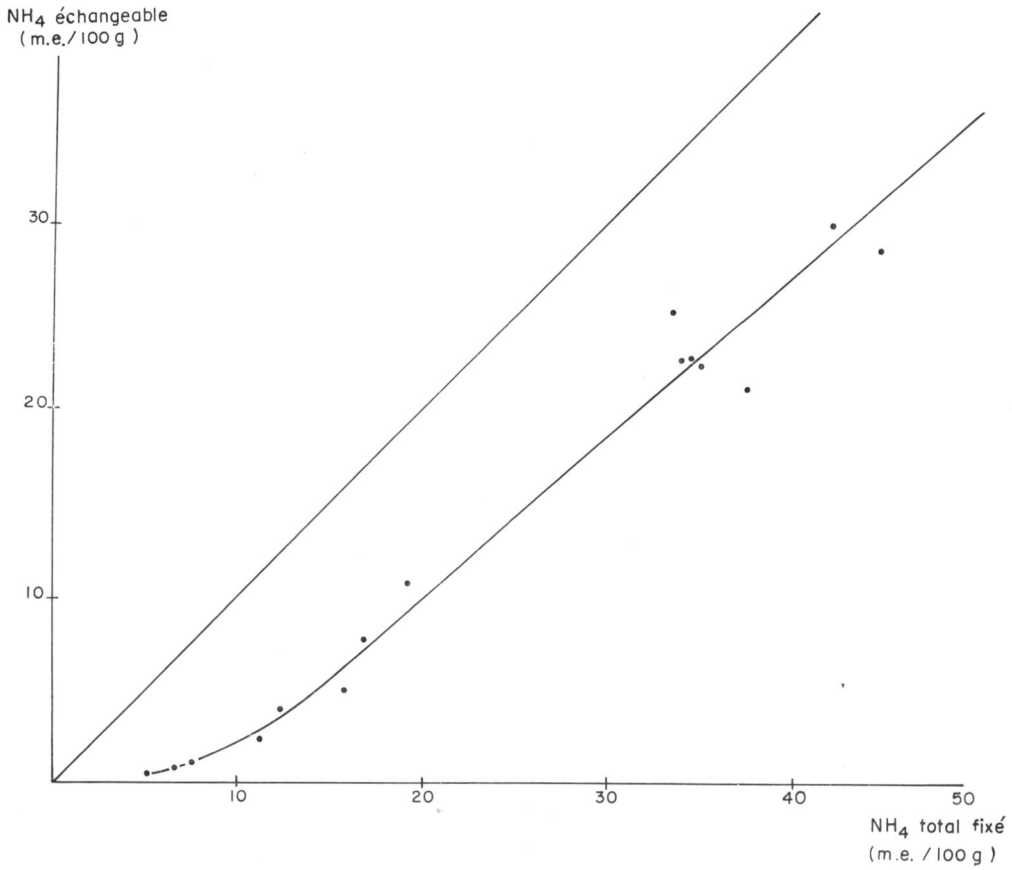



FIG. 1 — *$NH_4$ resté échangeable après dessication en fonction de $NH_4$ total fixé*

Les échantillons desséchés à 100° ont été soumis à l'attaque Kjeldahl pour le dosage de l'azote total. Par différence avec la quantité d'azote présente dans l'argile sodique, on a déterminé les quantités d'ammonium fixées. L'ammonium resté à l'état échangeable a été extrait par KCl normal.

La figure 1 donne l'ensemble des résultats obtenus par cette technique. L'ammonium rétrogradé augmente régulièrement avec la teneur en ammonium fixé pour atteindre 13 méq. dans l'argile saturée en $NH_4$.

Pour les faibles teneurs en ammonium fixé, la rétrogradation prend une importance relative très élevée ainsi que le montrent les résultats suivants :

méq. pour 100 g d'argile

| $NH_4$ fixé | $NH_4$ échangeable | $NH_4$ rétrogradé | Rétrogradation p. 100 de la qté fixée |
|---|---|---|---|
| — | — | — | — |
| 5,1 | 0,5 | 4,6 | 90,2 |
| 6,5 | 0,75 | 5,75 | 88,4 |
| 7,5 | 1,06 | 6,44 | 85,9 |
| 11,2 | 2,6 | 8,6 | 76,8 |
| 16,8 | 7,81 | 8,99 | 53,5 |

*Influence du nombre de dessiccations.*

La rétrogradation est importante après la première dessiccation. Elle augmente au cours des dessiccations suivantes :

| | $NH_4$ fixé | $NH_4$ échangeable | $NH_4$ rétrogradé |
|---|---|---|---|
| | — | — | — |
| argile séchée 1 fois ..... | 33,6 | 25,2 | 8,4 |
| — — 2 — ..... | — | 22,3 | 11,3 |
| — — 5 — ..... | — | 20 | 13,3 |
| — — 10 — ..... | — | 19 | 14,6 |

Le dosage de l'azote Kjeldahl après les dessiccations a montré que celles-ci ne provoquaient aucune perte dans l'azote total fixé.

*Influence de la rétrogradation de l'ion $K^+$ sur celle de l'ion $NH_4^+$.*

Un échantillon d'argile K a été soumis à 10 alternances d'humidification et de dessication à 70°. Cet échantillon a été ensuite saturé de $NH_4^+$ par traitements répétés, à l'aide d'une solution de $ClNH_4$ N, puis lavé et séché.

L'ammonium total fixé et l'ammonium échangeable ont été dosés. Les résultats ont été les suivants :

méq. pour 100 g d'argile

—

| | |
|---|---|
| $NH_4$ fixé ..... | 21,1 |
| $NH_4$ échangeable ..... | 19,0 |

La rétrogradation de K a fortement diminué la capacité d'échange de l'argile qui est passée de plus de 40 méq. à 21,1. L'ammonium fixé est resté presque intégralement à l'état échangeable.

III. — *Courbes de désorption de l'ammonium échangeable et rétrogradé*

La technique consiste à établir, en fonction de la température, la courbe de la désorption de l'ammonium fixé par les argiles (CHAMINADE, 1965, 1968).

Le chauffage jusqu'à la température de 650° permet de recueillir la totalité de l'ammonium fixé, qu'il soit échangeable ou non. Voici, à cet égard, quelques résultats obtenus :

| | méq. pour 100 g d'argile | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Kjeldahl argile Na ..... | 7,3 | 4,9 | 5,4 | 4,5 | 7,1 |
| Kjeldahl argile $NH_4$ ..... | 44,9 | 39,9 | 40 | 38,1 | 49,2 |
| $NH_4$ fixé ..... | 37,6 | 35,0 | 34,6 | 33,6 | 42,1 |
| Courbe de désorption ..... | 40,5 | 35,3 | 34,5 | 34,0 | 40 |

*Argile saturée de $NH_4$.*

La figure 2 donne la courbe de désorption dans une argile $NH_4$ saturée.

Cette courbe est régulière et ne présente pas le point d'inflexion à 400° observé pour la montmorillonite (CHAMINADE, 1965).

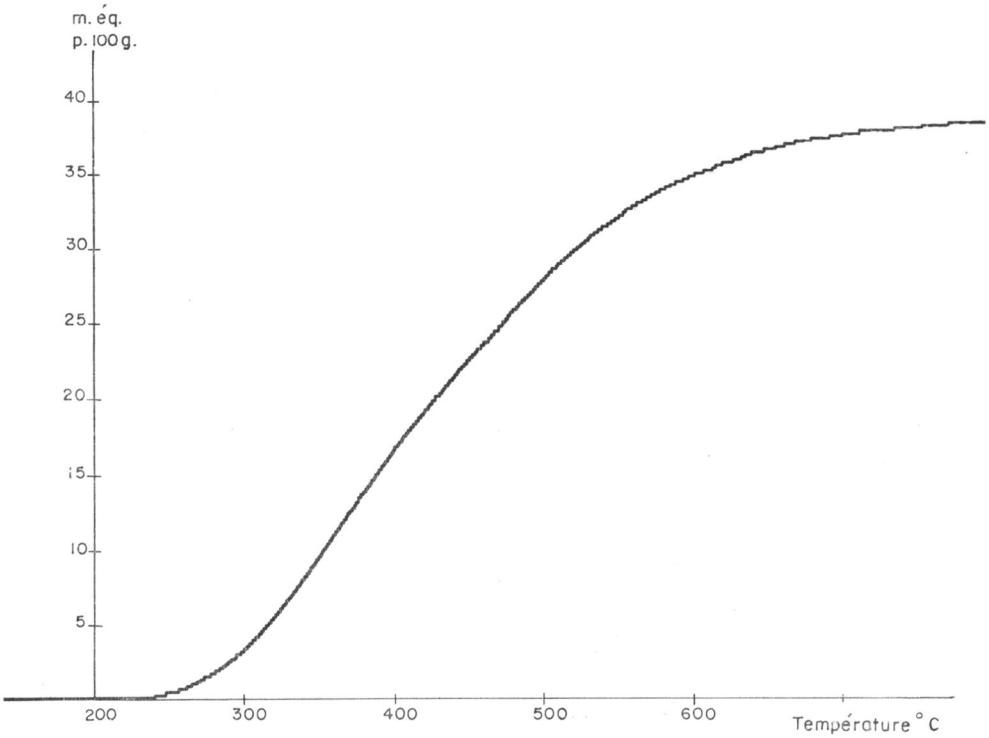



FIG. 2 — *Courbe de désorption de l'ammonium dans une argile $NH_4$ saturée*

La désorption commence à des températures comprises entre 200 et 250°.

L'argile ayant été desséchée présente une fraction notable d'ammonium rétrogradé (13 méq.) ; la courbe ne permet pas de faire la distinction entre les deux formes de l'ammonium.

*Argile Na-$NH_4$.*

Les figures 3, 4, 5, 6 représentent les courbes de désorption d'argiles Na-$NH_4$ à teneurs variables en $NH_4$ (8 à 20 méq.). La désorption commence à une température d'autant plus élevée que l'argile est plus pauvre en $NH_4$.

Ce fait est en relation avec la proportion relative de $NH_4$ rétrogradé, d'autant plus élevée que l'argile est plus pauvre en $NH_4$.

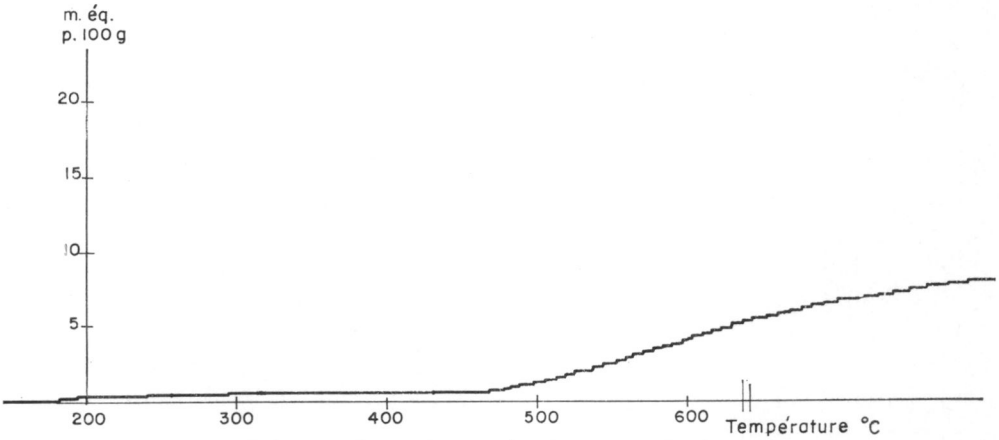



FIG. 3 — *Courbe de désorption dans une argile Na-$NH_4$*

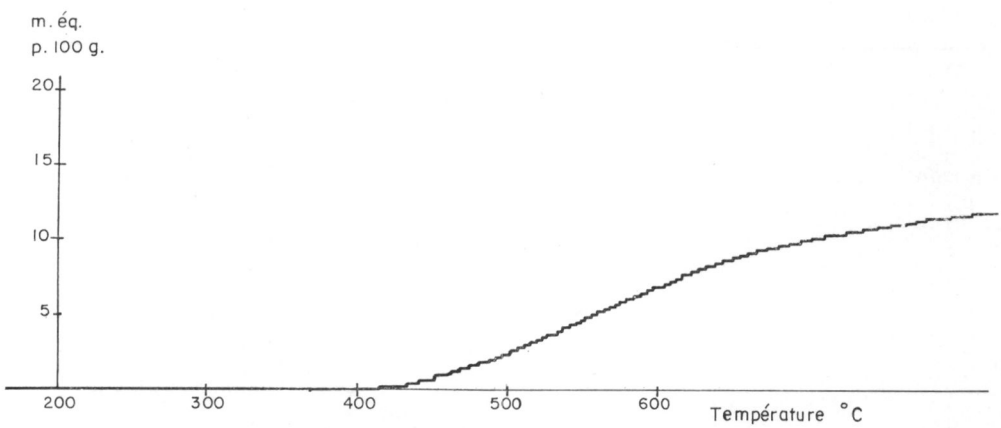



FIG. 4 — *Courbe de désorption dans une argile Na-$NH_4$*

*Désorption de l'ammonium rétrogradé.*

Une argile saturée de $NH_4$ a été desséchée puis $NH_4$ extrait par KCl normal jusqu'à élimination totale de l'ammonium échangeable. Après lavage à l'eau, l'argile

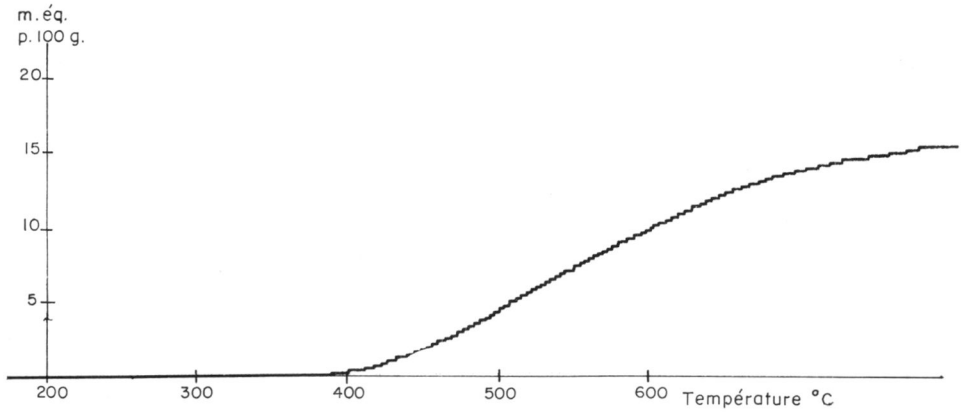



FIG. 5 — *Courbe de désorption dans une argile Na-$NH_4$*

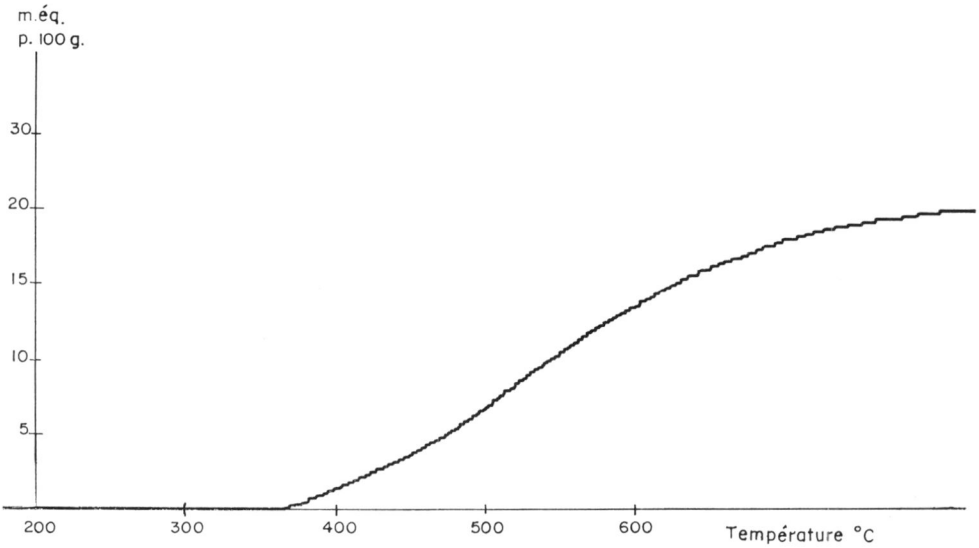



FIG. 6 — *Courbe de désorption dans une argile Na-$NH_4$*

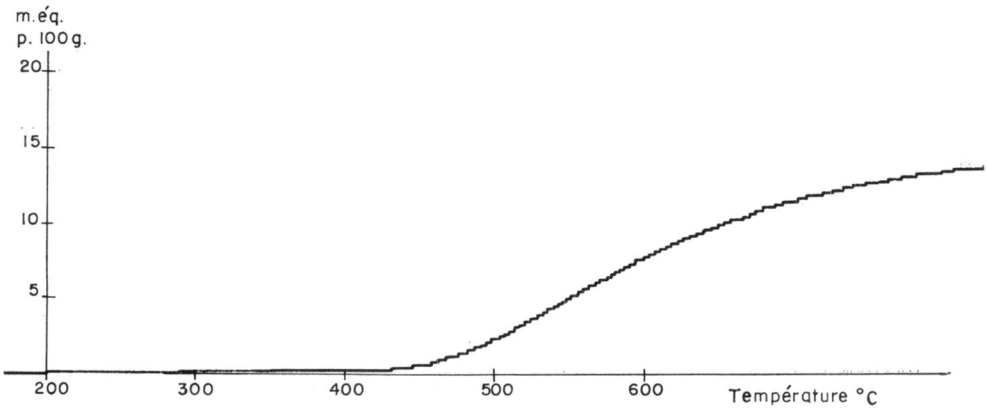



FIG. 7 — *Désorption de l'ammonium rétrogradé*

a été séchée et soumise à la désorption. La figure 7 représente la courbe obtenue.

On voit que la désorption commence à une température comprise entre 400 et 450°. La quantité totale désorbée dépasse 13 méq. correspondant à la totalité de l'ammonium rétrogradé.

Ce résultat est à rapprocher de la méthode préconisée par MOGILEVKINA (1964) pour le dosage de l'ammonium rétrogradé. Cet auteur préconise la destruction de la matière organique du sol par chauffage à 400° pendant 24 à 72 heures. On peut craindre que le maintien du sol à cette température pendant un temps aussi long n'entraîne une certaine perte d'ammonium non échangeable.

*Désorption de l'ammonium échangeable.*

Nous avons vu précédemment que la rétrogradation préalable de l'ion $K^+$ permettait de maintenir intégralement l'ammonium sous forme échangeable.

La figure 8 montre la courbe de désorption d'une argile préparée dans ces conditions.

L'allure de la courbe est considérablement modifiée par rapport à la courbe 7. La désorption commence à une température comprise entre 200 et 250°. Un léger point d'inflexion se manifeste au voisinage de 500°.

On peut conclure de ces essais que le passage de l'ammonium à l'état non échangeable se traduit par une élévation de la température à laquelle l'ammonium se désorbe.

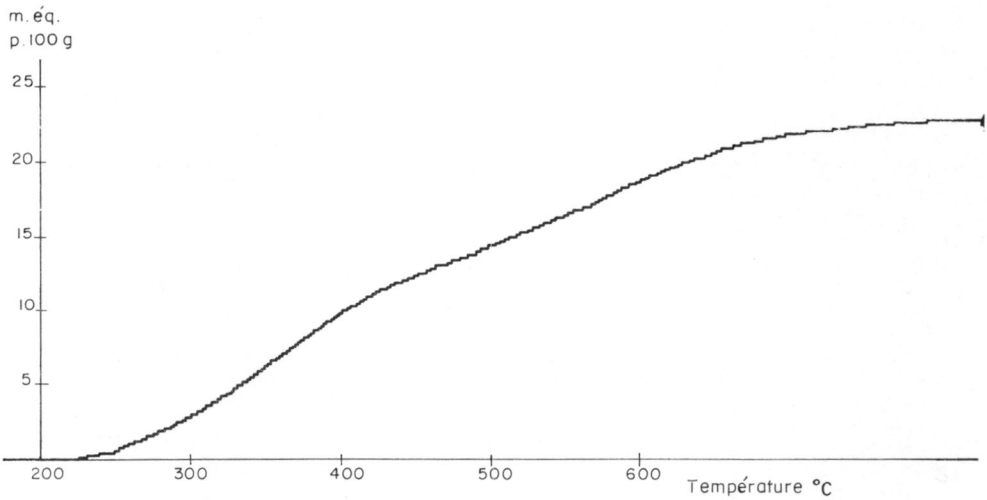



FIG. 8. — *Désorption de l'ammonium dans une argile K — $NH_4$*

*Bilan de l'ammonium fixé.*

Sur un ensemble de résultats, le bilan suivant a été obtenu pour des échantillons d'argile $NH_4$ séchés une fois :

*méq. pour 100 g d'argile*

| 1<br>$NH_4$ fixé | 2<br>$NH_4$ échangeable | 3<br>Courbe de désorption avant extr. $NH_4$ éch. | 4<br>Courbe de désorption après extr. $NH_4$ éch. | 5<br>2 + 4 |
|---|---|---|---|---|
| 37,6 | 21,1 | 40,5 | | |
| 35,0 | 22,3 | 35,3 | 9,95 | 32,25 |
| 34,6 | 22,6 | 34,5 | 13,6 | 36,2 |
| 33,6 | 25,2 | 34,0 | 12,2 | 37,4 |
| 42,1 | 29,9 | 40 | 13,8 | 43,7 |
| Moyenne | | | | |
| 36,58 | 24,22 | 36,86 | 12,39 | 36,61 |

$NH_4$ rétrogradé (1 — 2) : 12,36.
Courbe de désorption après extraction $NH_4$ échangeable : 12,39.
Dosage direct de $NH_4$ rétrogradé (méthode BREMNER) : 12,47.

## DEUXIÈME PARTIE

Après l'étude de la rétrogradation dans l'argile, les recherches ont été poursuivies dans le sol de limon renfermant l'argile en question.

Les échantillons proviennent de l'expérience des 42 parcelles du C. N. R. A. Cette expérience poursuivie depuis 40 ans comporte une série de parcelles recevant annuellement différents engrais, notamment des sels ammoniacaux. Le sol renferme 16,25 p. 100 d'argile.

### *Résultats analytiques*

Les échantillons des parcelles Témoin et de celles recevant du sulfate d'ammoniaque, du phosphate d'ammoniaque et du chlorure d'ammonium ont été analysés pour le dosage de l'azote sous différentes formes : azote total par Kjeldahl, $NH_4$ échangeable, $NH_4$ rétrogradé.

Ce dernier a été déterminé par la méthode BREMNER (1959) :

1 g de sol passé au tamis de 0,2 mm est additionné de 20 ml de BrOK obtenu par mélange de 6 ml de Br et 200 ml de KOH 2 N. Après 2 heures de contact, on ajoute 60 ml d'eau et on porte à l'ébullition.

Les échantillons sont ensuite centrifugés dans des tubes de plastique et traités à deux reprises par centrifugation, par une solution de KCl 0,5 N. Cette opération a pour but de débarrasser le sol de l'ammonium échangeable et de celui qui aurait pu prendre naissance par destruction de la matière organique.

Le culot de centrifugation est attaqué par 20 ml de mélange HCl + HF (167 ml HCl concentré et 325 ml HF à 52 p. 100. Compléter à 2 000 ml).

Après 24 heures de contact avec agitation intermittente, le contenu du tube est transvasé dans un matras de distillation avec 15 ml de KOH 10 N. L'ammoniaque dégagée est titrée par $SO_4H_2$ N/100.

Les résultats des dosages sont consignés dans le tableau 1 (méq. pour 100 g de sol).

La figure 9 représente les teneurs moyennes en azote total et en $NH_4$ rétrogradé des parcelles Témoin et des parcelles recevant des sels amoniacaux.

Les Témoins renferment une quantité de $NH_4$ rétrogradé voisine de 0,6 méq.

pour 100 g de sol, représentant 4 à 5 fois la teneur en $NH_4$ échangeable et environ 10 p. 100 de l'azote total.

La présence de cet ammonium rétrogradé s'explique par l'ammonisation de la matière organique.

Dans les parcelles recevant des sels ammoniacaux, la teneur en $NH_4$ rétrogradé est nettement plus élevée que dans les Témoins et marque une tendance à l'augmentation avec le temps ; au prélèvement de juillet 1970, cette teneur atteint en moyenne 0,9 méq. pour 100 g de sol.

TABLEAU I

| N° | Traitement | Date de prélèvement | N total | $NH_4$ éch. | $NH_4$ rétrogradé |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Témoin | novembre 1950 | 8,12 | 0,17 | 0,60 |
| | | novembre 1960 | 6,35 | 0,15 | 0,675 |
| | | novembre 1968 | 6,42 | 0,10 | 0,65 |
| | | juillet 1970 | 7,60 | 0,20 | 0,57 |
| 13 | Témoin | novembre 1950 | 7,2 | 0,27 | 0,675 |
| | | novembre 1960 | 7,0 | 0,20 | 0,775 |
| | | novembre 1968 | 6,15 | 0,10 | 0,57 |
| | | juillet 1970 | 6,3 | 0,15 | 0,57 |
| 2 | Sulfate d'ammoniaque | novembre 1950 | 8,95 | 0,52 | 0,725 |
| | | novembre 1960 | 7,52 | 0,40 | 0,85 |
| | | novembre 1968 | 6,47 | 0,37 | 0,77 |
| | | juillet 1970 | 9,32 | 0,97 | 0,95 |
| 19 | Sulfate d'ammoniaque | novembre 1950 | 7,55 | 0,30 | 0,70 |
| | | novembre 1960 | 6,22 | 0,47 | 0,75 |
| | | novembre 1968 | 6,10 | 0,22 | 0,65 |
| | | juillet 1970 | 7,70 | 0,50 | 0,77 |
| 3 | Phosphate d'ammoniaque | novembre 1950 | 8,05 | 0,32 | 0,625 |
| | | novembre 1960 | 7,97 | 0,25 | 0,90 |
| | | novembre 1968 | 6,45 | 0,20 | 1,080 |
| | | juillet 1970 | 9,35 | 1,10 | |
| 14 | Phosphate d'ammoniaque | novembre 1950 | 8,40 | 0,45 | 0,725 |
| | | novembre 1960 | 7,05 | 0,57 | 0,90 |
| | | novembre 1968 | 6,92 | 0,32 | 0,80 |
| | | juillet 1970 | 8,87 | 0,95 | 0,95 |
| 7 | Chlorure d'ammonium | novembre 1950 | 8,40 | 0,47 | 0,70 |
| | | novembre 1960 | 7,97 | 0,27 | 0,70 |
| | | novembre 1968 | 6,80 | 0,17 | 0,87 |
| | | juillet 1970 | 9,35 | 1,20 | 1,07 |
| 15 | Chlorure d'ammonium | novembre 1950 | 9,37 | 0,62 | 0,725 |
| | | novembre 1960 | 6,92 | 0,30 | 0,825 |
| | | novembre 1968 | 7,00 | 0,30 | 1,05 |
| | | juillet 1970 | 9,05 | 1,17 | 1,05 |

On peut penser que l'ammonium rétrogradé qui, par l'attaque Kjeldahl se retrouve dans l'azote total, joue un rôle non négligeable dans le bilan de l'azote des sols et dans la nutrition azotée des végétaux.

L'ammonium rétrogradé représente environ 250 kg/ha d'azote dans les sols témoins et s'élève à plus de 350 kg dans les sols recevant des sels ammoniacaux.

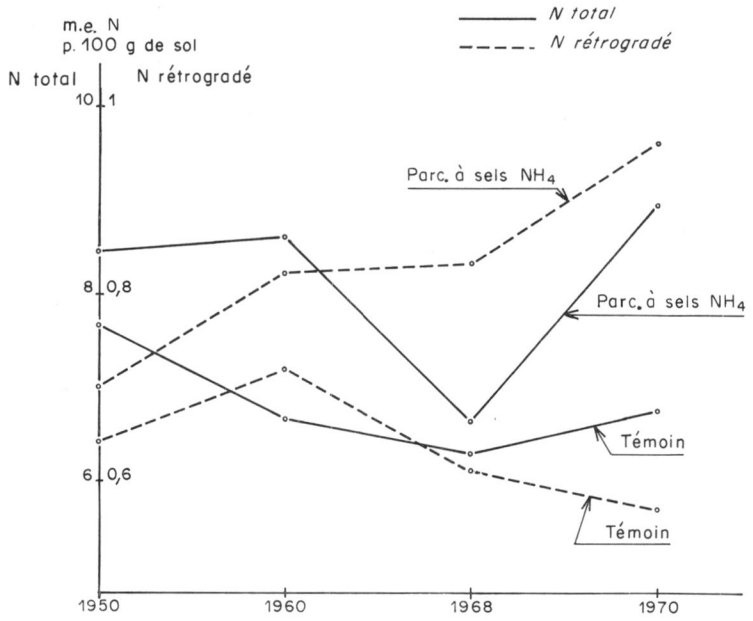



FIG. 9.

*Facteurs influençant la rétrogradation de l'ammonium dans le sol*

Il est évident que la rétrogradation de l'ammonium ne peut avoir lieu que dans les zones de contact entre les ions $NH_4$ et le sol.

L'épandage d'un engrais ammoniacal se traduit par une hétérogénéité du milieu ; l'ion $NH_4$ se fixe sur le complexe absorbant aux points de contact entre l'engrais et le sol. Une partie seulement de celui-ci est donc intéressée par le phénomène de rétrogradation.

D'autre part, au voisinage des particules de sel ammoniacal, il se forme des solutions plus ou moins concentrées de sel. Ces deux variables, répartition et concentration, ont été étudiées expérimentalement.

Des échantillons de 10 g de sol, préalablement passé au tamis de 0,2 mm, ont été placés dans des cristallisoirs de 55 mm de diamètre au contact de volumes variables de solutions de $SO_4(NH_4)_2$. Dans cet essai, la quantité globale de sulfate d'ammonium a été maintenue constante. Le dispositif était le suivant :

1. Sol témoin sans apport de sulfate d'ammonium
2. 10 g de sol + 2 gouttes de $SO_4(NH_4)_2$ à 45 %
3. — 4 gouttes — à 22,5 %
4. — 8 gouttes — à 11,25 %
5. — 16 gouttes — à 5,625 %
6. — 32 gouttes — à 2,812 5 %
7. — 64 gouttes — à 1,406 %
8. — 64 gouttes — à 45 %

Un échantillon a été ajouté dans lequel on a apporté 64 gouttes de la solution la plus concentrée afin de déterminer la rétrogradation maximum à cette concentration, lorsque la totalité du sol est au contact de la solution.

Les 64 gouttes de la solution représentaient un volume de 3 ml humidifiant totalement les 10 g de sol.

La quantité constante de sulfate d'ammonium apportée dans les échantillons 1 à 7 était de 42,2 mg soit 0,69 méq. par échantillon ou 6,9 méq. pour 100 g de sol.

Après 24 heures de contact, les échantillons ont été séchés à 90°, tamisés et homogénéisés.

Des prises d'essai correspondant à 2 g de sol ont été épuisées par KCl N et le dosage de l'ammonium rétrogradé a été ensuite effectué par la méthode BREMNER.

| | $NH_4$ rétrogradé (méq./100 g de sol) | Différence avec Témoin |
|---|---|---|
| 1 (Témoin) | 0,815 | — |
| 2 | 1,425 | 0,610 |
| 3 | 1,64 | 0,825 |
| 4 | 1,76 | 0,950 |
| 5 | 2,015 | 1,200 |
| 6 | 2,10 | 1,285 |
| 7 | 2,225 | 1,410 |
| 8 | 2,115 | 1,300 |

Pour l'échantillon 8 dans lequel la concentration du sulfate d'ammonium est trente fois plus élevée que dans l'échantillon 7, la rétrogradation reste sensiblement la même. Il n'y a donc pas d'influence de la concentration sur le phénomène.

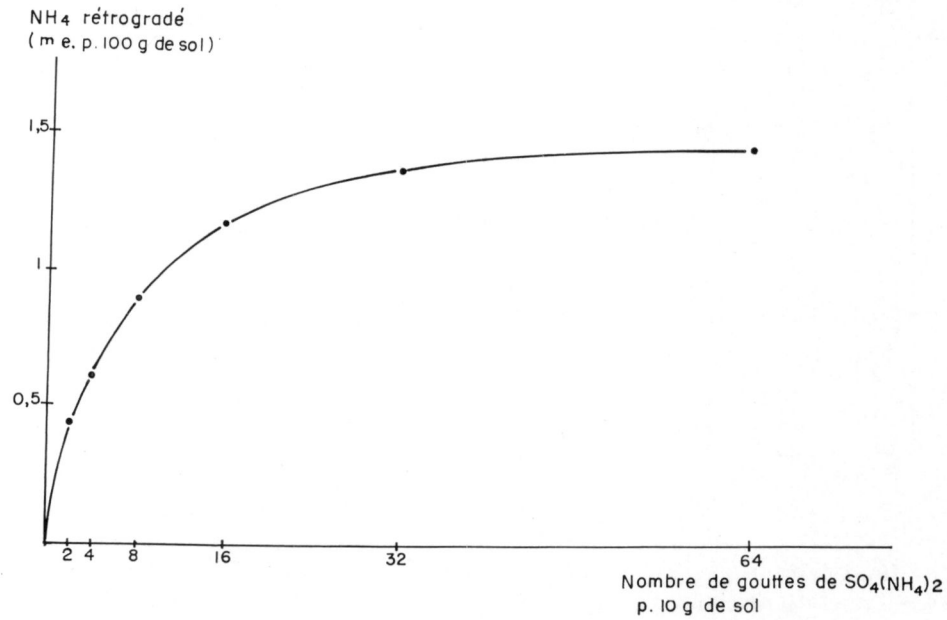



FIG. 10. — *Rétrogradation en fonction du volume de la solution de* $SO_4(NH_4)_2$

Comme il était à prévoir, en présence d'une quantité constante de sulfate d'ammonium ajouté, l'ammonium rétrogradé croît avec le volume de la solution (fig. 10).

Partant du principe évident que la rétrogradation exige un contact entre le sol et les ions $NH_4$, on peut évaluer, grâce aux résultats précédents, l'importance de la diffusion des ions $NH_4$ dans le sol.

Dans l'échantillon 7, le volume de solution ajoutée (3 ml) était suffisant pour que les 10 g de sol soient au contact de la solution. La rétrogradation atteignait alors un maximum de 1,41 méq. pour 100 g.

Dans l'échantillon 2, la rétrogradation était de 0,61 méq ; on peut en conclure que la diffusion des ions $NH_4$ s'est produite dans $\frac{0,61}{1,41}$ soit 43 p. 100 du volume total du sol.

Les 10 g de sol occupant un volume de 8 ml et les deux gouttes de solution représentant 0,094 ml, on constate que la diffusion des ions $NH_4$, à partir d'une solution de sulfate d'ammonium à 45 p. 100 s'est produite dans un volume de sol de 3,4 ml soit près de 40 fois le volume de la solution initiale.

En faisant un calcul analogue pour les autres concentrations, on obtient la courbe suivante qui représente le volume de diffusion des ions $NH_4$ à partir de 1 ml de solutions de sulfate d'ammonium de différentes concentrations (fig. 11).

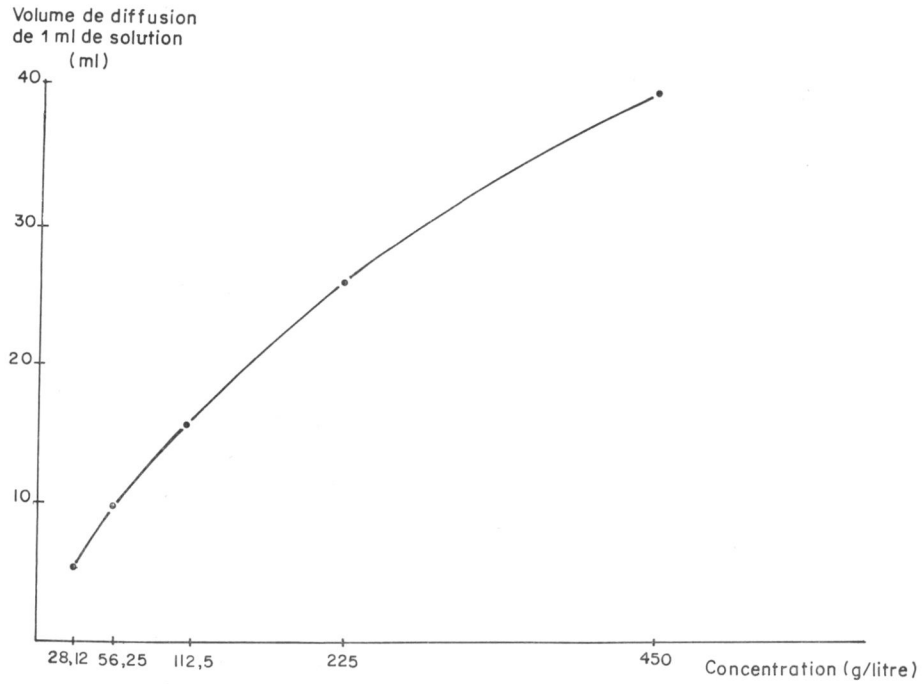



FIG. 11. — *Volume de diffusion d'une solution de $SO_4(NH_4)_2$ en fonction de la concentration*

Il est évident que le phénomène de diffusion est lié à l'état physique du milieu. Dans l'essai décrit ci-dessus, le sol avait été passé au tamis de 0,2 mm et se trouvait par conséquent dans des conditions très favorables à la diffusion ; le phénomène

n'a pas été étudié ici systématiquement. Ces premiers résultats semblent indiquer que les diffusions ioniques, surtout en présence de solutions concentrées, sont beaucoup plus importantes qu'on aurait pu le prévoir.

### *Influence de la rétrogradation sur l'assimilabilité de l'ammonium par les végétaux*

Sous forme rétrogradée, l'ion $NH_4$ est très peu mobile et on peut prévoir qu'il ne participera que de façon très limitée à la nutrition des microorganismes ou des végétaux.

Pour étudier l'influence de la rétrogradation sur l'assimilabilité, en temps court, de l'azote ammoniacal, l'essai suivant a été réalisé :

Des échantillons d'un sous-sol de limon dont l'argile est identique à celle des sols précédemment étudiés ont été partagés en trois lots : A, B et C.

Les lots A et C ont été additionnés de 150 ml d'eau pour 750 g de sol.

Le lot B a reçu 150 ml d'une solution de $SO_4(NH_4)_2$ N/7 soit un apport de 2,85 méq. pour 100 g de sol.

Les trois lots ont été desséchés à la température ordinaire.

Des échantillons de 100 g des trois lots ont été placés dans des cristallisoirs de 10 cm de diamètre et mélangés à 100 g de billes de verre de 2 mm.

On a ajouté à tous les échantillons de 100 g, 10 ml d'une solution de $PO_4HK_2$ à 2,5 p. 100 puis 15 ml d'eau dans les lots A et B. Le lot C a reçu 10 ml de $SO_4(NH_4)_2$ N/3,5 et 5 ml d'eau.

Le lot A n'a pas reçu d'azote ; les lots B et C ont été additionnés d'une quantité identique de sulfate d'ammonium mais le lot B avait été desséché après addition du sel ammoniacal.

*De gauche à droite :*

A — Témoin sans azote.
B — Série avec $NH_4$ rétrogradé.
C — Même dose de N que B mais sans rétrogradation

Un semis de Ray-grass, à raison de 100 graines par cristallisoir a été effectué le même jour dans tous les cristalloirs. Pendant la période de végétation, un arrosage journalier était effectué à poids constant. La récolte (parties aériennes et racines) a eu lieu après cinq semaines de végétation.

L'expérience comportait cinq répétitions (cf. cliché).

L'analyse du sol au départ de l'essai donnait les résultats suivants (méq. pour 100 g) :

| | $NH_4$ échangeable | $NH_4$ rétrogradé |
|---|---|---|
| | — | — |
| A | 0,077 | 0,787 |
| B | 0,892 | 2,367 |
| C | 2,047 | 1,425 |

Très pauvre en $NH_4$ échangeable, l'échantillon-témoin renfermait une quantité notable de $NH_4$ rétrogradé. Dans l'échantillon C qui n'a pas subi de dessiccation après l'apport du sulfate d'ammoniaque, une légère rétrogradation a eu lieu, représentant 0,638 méq. pour 100 g de sol soit 23 p. 100 de la quantité apportée.

Cette rétrogradation a atteint 1,580 méq. pour 100 g dans l'échantillon B, soit 56 p. 100.

A la fin de la période de végétation, les résultats suivants ont été obtenus :

| | Poids de récoltes (g) (moyenne des cinq répétitions) | N exporté (méq.) |
|---|---|---|
| | — | — |
| A sans azote | 0,352 | 0,275 |
| B | 0,786 | 0,764 |
| C | 1,156 | 1,761 |

Le phénomène de rétrogradation beaucoup plus intense en B qu'en C a fortement diminué l'efficacité de l'azote ; à quantité égale d'azote apporté, le rendement est passé de 1,156 g en C à 0,786 g en B.

D'autre part, déduction faite du témoin, les quantités d'azote exporté, à partir du sulfate d'ammonium ajouté ont été de 1,486 méq. en C et de 0,489 méq en B.

L'ammonium rétrogradé, dans cette expérience, n'est pas intervenu dans la nutrition des végétaux.

Les dosages effectués en fin d'expérience ont donné les résultats suivants :

| | $NH_4$ rétrogradé (méq. pour 100 g de sol) |
|---|---|
| | — |
| A | 0,798 |
| B | 2,690 |
| C | 1,466 |

En aucun cas, il n'y a eu de diminution de la teneur en $NH_4$ rétrogradé ; en B, le chiffre est légèrement supérieur au chiffre initial mais cette différence n'est pas significative.

Les résultats précédents établissent nettement la chute d'efficacité de l'azote consécutive à la rétrogradation.

Les conclusions rejoignent celles de PETERSBURGSKI et SMIRNOV (1964).

Ces auteurs ont cultivé de l'orge en pots de Mitscherlich pendant 3 mois sur deux sols différents.

La teneur en ammonium rétrogradé de ces sols n'avait pas diminué à la fin de la période de végétation.

Toutefois, il n'est pas permis de conclure de ces essais de courte durée que l'ammonium rétrogradé est définitivement inassimilable par les végétaux ou les micro-organismes nitrificateurs. On sait en effet que le phénomène de rétrogradation de l'ammonium, comme celui du potassium est réversible et que l'ammonium rétrogradé doit rentrer dans le cycle de l'azote dans des conditions dépendant de la nature des argiles. Des recherches sont en cours sur ce point.

## CONCLUSIONS

Le phénomène de rétrogradation de l'ammonium dans les sols peut intéresser des quantités très notables d'azote.

Dans l'argile ayant fait l'objet de cette étude, la rétrogradation atteint 4 méq. pour 100 g d'argile en milieu humide et s'élève à plus de 12 méq. après dessiccation, représentant le 1/3 de la capacité d'échange de l'argile.

Dans le sol, on a atteint un maximum de rétrogradation de 2,7 méq. pour 100 g de sol représentant plus de 1 000 kg N/ha.

La rétrogradation par dessiccation est proportionnellement d'autant plus importante que la quantité d'ammonium fixé est plus faible. Pour des quantités fixées inférieures à 5 méq. pour 100 g d'argile, la presque totalité de l'ammonium passe sous forme non échangeable.

L'ammonium rétrogradé est, comme l'ammonium échangeable susceptible de se désorber par la chaleur. Le passage de la forme échangeable à la forme rétrogradée se traduit par une élévation de la température de désorption.

Ces modifications de forme de l'azote ammoniacal ont une incidence sur le plan agronomique : dans des expériences de courte durée (2 à 3 mois), l'ammonium rétrogradé n'intervient pas dans la nutrition azotée des végétaux. Il reste à préciser l'évolution de cette forme d'azote sur des périodes plus longues.

Dans les recherches sur le bilan de l'azote, il convient de prendre en considération cette forme d'azote ammoniacal qui se retrouve dans le dosage de l'azote par la méthode Kjeldahl et peut représenter une fraction importante de l'azote total du sol.

*Reçu pour publication en février 1971.*

## SUMMARY

INVESTIGATIONS ON THE FIXATION OF THE AMMONIUM ION

The fixation phenomenon, by which the ammonium ion passes into a state of non-exchangeability, was studied in the clay fraction of a silty loam, and in the soil itself. The clay was composed of a mixture of Illite, Kaolinite and Montmorillonite.

Fixation can occur in a humid environment. In these conditions it attains a level of 4 meq

per 100 gm of clay. Dessication considerably intensifies this phenomenon ; after dessiccation, fixed $NH_4$ can attain a level of 12 meq. per 100 g of clay, corresponding to approximately 1/3 of the exchange capacity of the clay.

Fixation becomes relatively more important as the $NH_4$ content is reduced, and becomes almost total, following dessiccation, for quantities lower than 5 meq. per 100 gm of clay.

Plant utilisation of fixed $NH_4$ was studied through tests of the NEUBAUER type. Rye-grass crops were produced in the presence of identical quantities of ammonium sulphate. In one series of tests, maximum $NH_4$ fixation was effected by soil dessiccation after addition of ammonium salt. Fixation resulted in a considerable reduction in plant development and nitrogen absorption. In this test, fixed ammonium did not contribute to the nitrogenous nutrition of the plant.

The soil under study was capable of holding upto 2.7 meq. of retrograded $NH_4$ per 100 gm, corresponding to over 1 000 kg per hectare (900 lb per acre). This form of nitrogen is found in the system of total nitrogen dosage by the Kjeldahl method.

## ZUSAMMENFASSUNG

### UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE RÜCKBEWEGUNG DES AMMONIUM IONS

Das Rückbewegungsphänomen des Uebergangs zu dem unaustauschbaren Zustand des Ions $NH_4^+$ wurde bei der Tonfraktion eines Lehmbodens und bei diesem Boden selbst untersucht. Der Ton besteht aus einer Mischung von Illit, Kaolinit und Montmorillonnit.

Die Rückbewegung ist im feuchten Milieu möglich, wobei sie 4 meq. für 100 g Ton beträgt. Das Trocknen verstägt. Das Trocknen verstärkt beträchtlicherweise dieses Phänomen. Nach Trocknung kann das rückgeführte $NH_4$ bis zu 12 meq. für 100 g Ton erreichen, was ungefähr 1/3 des Austauschvermögens des Tons darstellt.

Die Rückbewegung ist verhältnismässig um so beträchtlicher, als die $NH_4$-Mengen geringer sind. Nach Austrocknung ist sie bei niedrigeren Mengen als 5 meq. für 100 g Ton fast vollständig.

Die Benutzung bei Pflanzen von rückgeführtem $NH_4$ wurde mittels Versuchen des Typus NEUBAUER untersucht. Die Raygras-kulturen wurden in gegenwart von identischen Ammoniumsulfatmengen durchgeführt. In einer der Versuchsreihen wurde durch Austrocknung des Bodens nach Beimischung von Ammoniumchlorid eine maximale Rückbewegung von $NH_4$ bewirkt.

Die Rückbewegung drückte sich durch eine bedeutende Abnahme des Wachstums der Pflanzen und der absorbierten Stickstoffmenge aus. Bei diesem Versuch beteiligte sich das rückgeführte Ammonium nicht an der Stickstoffversorgung der Pflanze.

Der untersuchte Boden kann bis zu 2,7 meq. für 100 g rückgeführtes $NH_4$ enthalten, was mehr als 1 000 kgN pro Hektar darstellt. Diese Stickstoff-Form wird in der Dosierung des totalen Stickstoffs an Hand des Kjeldahl-Verfahrens festgestellt.

## РЕЗЮМЕ

*Изучение ретроградации иона аммония.*

Р. ШАМИНАД при техническом сотрудничестве А. М. ТАБАРО.

Явление ретроградации перехода иона $NH^+_4$ в необменное состояние изучалось в глинистой фракции суглинистой почвы, и в самой почве. Глинистая фракция этой почвы состояла из смеси иллита, каолинита и монтмориллонита.

Ретроградация возможна в увлажненной среде. В этом случае, она достигает 4 м. э. на 100 гр. глины. Высушивание почвы усиляет это явление : ретроградация $NH_4$ может в этом случае достичь 12 м. э. на 100 гр. глины, что представляет около трети обменной способности глины.

Чем меньше $NH_4$ в глине, тем сильнее ретроградация. Она бывает почти полной после высушивания почвы, для количеств $NH_4$ меньших чем 5 м. э. на 100 гр. глины. Использование растениями ретроградированного $NH_4$ изучалось в опытах типа Нейбауера. Культивировался рай-грасс в присутствии одинаковых количеств сернокислого аммония. В одной из серий опыта вызывалась максимальная ретроградация $NH_4$ при помощи высушивания почвы, после внесения аммиачной соли. Ретроградация проявила себя сильным ослаблением развития растений и уменьшением количеств поглощенного ими азота. Ретроградированный аммоний не принимал, значит, участия в азотном питании растений.

Изученая почва может содержать до 2,7 м. э. на 100 гр. ретроградированного $NH_4$, что представляет более 1 000 кг. на гектар. Эта форма азота опознается при дозировке общего азота методом Кьельдаля.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BREMNER J. M., 1959. Determination of fixed ammonium in soil. *J. Agric. Sci.*, **52**, 117-160.

BREMNER J. M., NELSON D. W., SILVA J. A., 1967. Comparison and evaluation of methods of determining fixed ammonium in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31**, 466.

CHAMINADE R., 1940. Fixation de l'ion $NH_4$ par les colloïdes argileux des sols sous forme non échangeable. *C. R. Acad. Sci.*, **210**, 264.

CHAMINADE R., 1965. Recherches sur la désorption en fonction de la température de l'ion ammonium fixé par les argiles. *Ann. agron.*, **16** (6), 637-661.

CHAMINADE R., 1968. Passage à l'état non échangeable des ions Potassium et Lithium. Étude du phénomène à l'aide des courbes de désorption par la chaleur de l'ion Ammonium. *Ann. agron.*, **19**, (6), 631-652.

DHARIVAL A. P. S., STEVENSON F. J., 1958. Determination of fixed ammonium in soils. *Soil Sci.*, **86**, 343-349.

GOUNY P., MÉRIAUX S., GROSMAN R., 1960. Importance de l'ammonium à l'état non échangeable dans un profil de sol. *C. R. Acad. Sci.*, **251**, 1418.

MOGILEVKINA I. A., 1964. Fixation of Ammonium in the soil and method of determining it. *Soviet Soil Sci.*, **2**, 185-196.

MOGILEVKINA I. A., 1969. Comparison of methods of determining fixed ammonium in the soil. *Soviet Soil Sci.*, **2**, 229-237.

NELSON D. W., BREMNER J. M., 1956. An evaluation of Mogilevkina's method of determining fixed ammonium in soils. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **30**, 409-410.

PETERSBURGSKI A. V., SMIRNOV P. M., 1964. Fixation of ammonium in some soils of the U. S. S. R. and its availability for plants. *Fertility and amelioration of soils in U. S. S. R.*, 75-83.

RODRIGUES G., 1964. Fixed ammonia in tropical soils. *J. Soil Sci.*, **5**, 264-274.

SCHARTSCHABEL P., 1961. Bestimnung des fixierten ammoniums in Boden. *Z. Pfl. Ern. Dung. Bodenk.*, **93**, 125-136.

SILVA J. A., BREMNER J. M., 1966. Determination and isotop radioanalysis of different forms of nitrogen in soils. V. Fixed ammonium. *Soil Sci. Soc. Proc.*, **30**, 587-594.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *résumé* en anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves* : les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Henin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

# annales agronomiques

Bimestriel

1971

Vol. 22. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1971, **22** (4), 367-381.

# ASSIMILATION NETTE, UTILISATION DE L'EAU ET MICROCLIMATOLOGIE D'UN CHAMP DE MAÏS

## I. — Objectifs et présentation du dispositif expérimental de la Minière

P. CHARTIER, A. PERRIER et M. VERBRUGGHE

*Station centrale de Bioclimatologie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

RÉSUMÉ

Ce premier article de la série « Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs » ne vise qu'à présenter les différentes études entreprises d'une manière coordonnée sur le dispositif de La Minière, afin de permettre au lecteur de situer les articles qui suivront dans cet ensemble.

L'assimilation nette et l'évapotranspiration sont calculées à l'aide d'une part des profils de $CO_2$ et de $H_2O$ dans l'air et, d'autre part, de la détermination des coefficients de transfert turbulent.

L'évapotranspiration est constamment enregistrée à l'aide d'évapotranspiromètre. L'assimilation nette de la culture est, par ailleurs, étudiée grâce à la combinaison de l'analyse de la répartition des rayonnements solaires entre les feuilles et de l'assimilation nette de l'unité de surface de feuille et des autres organes.

L'étude de la diffusion de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère est, pour l'instant, limitée outre les mesures d'évapotranspiration à celle de la régulation stomatique et à celle de la variation de la teneur en eau des feuilles.

La détermination du microclimat dans le couvert végétal et notamment de la température des organes en fonction du climat et des caractéristiques du couvert est abordée.

Une revue sommaire des techniques utilisées et des moyens mis en œuvre est faite dans le présent article.

Le rendement en quantité et qualité d'une production végétale est le fruit de mécanismes physiologiques complexes sur lesquels l'homme essaie d'agir. Parmi ces processus, l'assimilation nette du gaz carbonique par la culture est l'un des plus importants ; elle est à l'origine de la production des matériaux organiques nécessaires à la croissance et au développement des plantes.

Toutefois l'étude de l'assimilation nette de la culture en fonction des facteurs biologiques et physiques (lumière, eau, température) ne suffit pas à expliquer les variations de production d'une espèce donnée entre les années, entre les régions, entre

les variétés, entre les traitements etc. L'étude de la croissance et des phénomènes de développement est également nécessaire.

L'utilisation de l'eau pour les besoins agricoles est de plus en plus concurrencée par les utilisations à des fins industrielles et pour les besoins ménagers.

La rentabilité d'une opération d'irrigation se pose en des termes qui évoluent avec le développement économique. Pour y répondre, à côté des études économiques et agronomiques, une recherche approfondie des effets de l'alimentation en eau sur la physiologie de la plante et notamment sur l'assimilation nette s'avère nécessaire. L'étude de ces mécanismes peut en outre conduire à imaginer des nouveautés techniques appelées à un certain développement. Il n'est pas utopique en effet de penser qu'avec l'augmentation rapide des besoins en eau douce, d'une part, le problème de l'irrigation se posera en des termes nouveaux et que l'on cherchera, d'autre part, à diminuer l'énorme quantité d'eau transpirée naturellement, en acceptant une baisse de rendement tout en cherchant à rendre cette dernière aussi faible que possible. Dans ces perspectives, l'étude de l'utilisation de l'eau par les cultures se justifie et complète l'analyse des relations entre l'assimilation nette et les facteurs de production en général.

L'amélioration de la productivité végétale suppose que des études relevant de disciplines très diverses soient menées. Parmi ces disciplines, certaines demandent comme pour l'analyse de l'assimilation nette et du facteur eau une bonne caractérisation de tel ou tel facteur du microclimat dans la culture (étude du développement des plantes, épidiémologie, etc.). C'est la raison pour laquelle la détermination du microclimat dans la végétation à partir des données météorologiques d'une part et de la constitution du couvert végétal d'autre part fera l'objet d'une étude particulière.

Le choix du maïs comme plante d'étude résulte du fait que c'est une culture haute et aérée qui se prête bien à l'expérimentation microclimatique ; elle a de plus été retenue dans le cadre du groupe Processus de la Productivité (PP) du Programme Biologique International (PBI), ensemble dans lequel le dispositif de La Minière et les activités qui y sont menées s'inscrivent sans difficulté. Par ailleurs, cette culture a une importance croissante dans la région parisienne.

L'étude simultanée, sur une même parcelle, par différents spécialistes, de l'assimilation nette, de l'utilisation de l'eau et du microclimat d'un même champ de maïs a paru être le moyen le plus efficace d'agir. En effet, dans un système aussi complexe qu'une culture, l'analyse d'un phénomène donné suppose, en premier lieu, que l'on sache l'appréhender et mesurer les nombreuses grandeurs dont il dépend, en second lieu, que l'on puisse déterminer le poids du phénomène considéré sur l'assimilation nette. Pour ces deux raisons, la présence des différents spécialistes sur la même parcelle et aux mêmes instants est bénéfique ; elle économise des mesures — puisque chacun peut fournir aux autres les caractéristiques microclimatiques par exemple qu'il a acquises pour son propre objectif de travail.

Cette façon d'agir a déterminé le mode de présentation des résultats expérimentaux. On a choisi de rédiger une série d'articles portant tous le même titre [1] général mais dont le sous-titre annonce la teneur de l'article proprement dit. Dans ce premier article de présentation, on se contentera de situer sommairement les différents

[1] On a repris ici une forme de présentation déjà adoptée par l'équipe du professeur LEMON (Cornell University-U. S. A.) qui a publié une dizaine d'articles dans *Agronomy Journal* sous le titre commun : Photosynthesis under field conditions.

travaux effectués les uns par rapport aux autres tels qu'il est possible de le faire après 2 campagnes de mesures alors que 4 à 5 campagnes supplémentaires sont prévues. C'est dire également que la quinzaine d'articles constituant cette série devrait s'étaler sur 4 à 5 ans environ.

## I. — LES OBJECTIFS

On se propose d'étudier l'assimilation nette, l'utilisation de l'eau et le microclimat d'une culture de maïs, en situation de plaines dégagées. On cherchera en outre à perturber le moins possible les conditions naturelles.

La plupart des études faites ont été précédées d'une analyse théorique qui a, entre autres choses, permis de préciser la nature des grandeurs à mesurer pour aboutir à tel ou tel résultat. Les méthodes utilisées supposent qu'un certain nombre d'hypothèses soient vérifiées. Leur vérification constitue le sujet de certains travaux. Ces études théoriques ne seront pas toutes présentées dans cette série d'articles car pour la plupart elles ont fait l'objet de publications antérieures.

L'utilisation d'une seule technique de mesure fournit habituellement un résultat sur lequel pèse un doute car il est unique ; c'est pourquoi un autre aspect des études présentées consistera à appréhender les principales grandeurs (assimilation nette de la culture, évapotranspiration, etc.) à l'aide de plusieurs méthodes indépendantes et utilisées simultanément. Tout d'abord, le recoupement des résultats en garantit la qualité et permet de poursuivre le travail sur des bases plus solides ; de plus, il est ainsi possible d'apprécier la fidélité et les limites des méthodes les plus simples et d'en prévoir une utilisation généralisée. Cet aspect méthodologique constitue une part importante du travail effectué.

### I.I. — *Assimilation nette du gaz carbonique et production de matière sèche d'une culture de Maïs*

La quantité de gaz carbonique fixé par la plante est un moyen de caractériser la croissance sur un intervalle de temps court. En sommant les assimilations nettes successives sur une période de quelques jours, on obtient des valeurs susceptibles d'être comparées aux augmentations pondérales en matière sèche.

L'assimilation nette du $CO_2$ se mesure sur un intervalle de temps de l'ordre de quelques minutes. A cette échelle, on peut tenir compte de la fluctuation des facteurs climatiques et mieux appréhender l'influence du climat sur la croissance du maïs. Il faut bien entendu être conscient que ces facteurs climatiques agissent simultanément sur les phénomènes de développement et que les variations de la quantité de $CO_2$ fixé ne suffisent pas à traduire l'influence du climat sur la production.

### I.II. *Méthodes reposant sur la diffusion du $CO_2$ dans l'air.*

La mesure de la quantité de $CO_2$ fixé par la plante peut être faite directement en se plaçant à l'extérieur du système plante dans l'air entourant la culture. Les méthodes nécessaires à l'étude de la diffusion du $CO_2$ dans l'air font appel aux lois de la mécanique des fluides et de l'énergétique.

La détermination des coefficients de transfert caractéristiques des échanges

au sein de la masse d'air en mouvement (vitesse de vent, turbulence, convection thermique, etc.) est une mesure à la fois indispensable et délicate. Toutefois, cette étude est essentielle car, en régime turbulent, les coefficients de transfert ont la même valeur pour le gaz carbonique, la vapeur d'eau, la chaleur, les polluants, etc. ; de ce fait, on trouve des applications dans de très nombreux secteurs.

Par ailleurs, la mesure de la quantité de $CO_2$ fixé par la plante nécessite la détermination des profils de concentration du $CO_2$ dans l'air au-dessus et au sein de la végétation.

Ces premières méthodes ignorent le processus de fixation du $CO_2$ au niveau des feuilles. Elles ont le gros avantage de ne pas perturber le milieu naturel. Par contre, elles sont en général délicates à mettre en œuvre et ne peuvent être utilisées par n'importe quelles conditions météorologiques.

Les méthodes directes sont au nombre de quatre. Elles se différencient par le moyen utilisé pour déterminer le coefficient de transfert :

— la méthode du bilan d'énergie ; elle exige que l'on fasse les mesures du rayonnement net, du flux de chaleur dans le sol et des gradients de température et de masse volumique de vapeur d'eau dans l'air ; elle est relativement simple, assez fidèle et repose sur un petit nombre d'hypothèses ;

— la méthode aérodynamique ; elle demande des mesures des gradients de

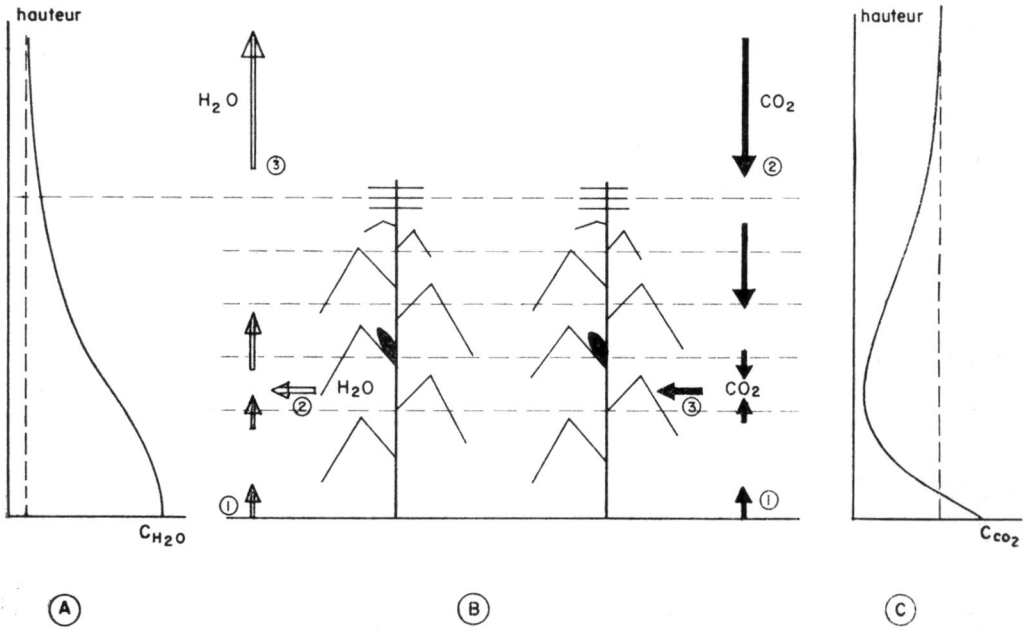



FIG. 1. — *Les flux et profils de $CO_2$ et de vapeur d'eau au sein et au-dessus d'une culture au milieu de la journée*

A — Profil de concentration en vapeur d'eau.

B — La vapeur d'eau (à gauche sur la figure) évaporée par le sol (1) et transpirée par les feuilles (2) diffuse vers l'atmosphère (évapotranspiration réelle) (3).
Le gaz carbonique (à droite sur la figure) diffusant à partir du sol (1) et à partir de l'atmosphère vers la culture (2) est assimilé par les feuilles (3).

C — Profil de concentration en gaz carbonique.

vitesses de vent au-dessus et dans la culture, et parfois des profils de température ; elle est plus délicate à mettre en œuvre et fait appel à un plus grand nombre d'hypothèses que la précédente ; elle a par contre l'avantage de porter sur le mécanisme même du transfert et offre de ce fait de nombreuses perspectives ;

— la méthode radioactive ; elle s'appuie sur la diffusion et la désintégration du thoron radioactif naturellement émis par le sol ; cette méthode originale n'a pas encore été suffisamment appliquée pour pouvoir être jugée ;

— la méthode de l'évapotranspiromètre sensible ; elle consiste à mesurer d'une part l'évapotranspiration réelle par pesée, sur une courte période (10 à 15 minutes) et d'autre part le gradient de masse volumique en vapeur d'eau dans l'air au-dessus de la culture ; cette méthode repose sur un nombre minimal d'hypothèses ; elle exige l'emploi d'un évapotranspiromètre très sensible.

La connaissance du coefficient de transfert $k$ déterminé par les trois premières méthodes permet d'évaluer le flux de $CO_2$ à condition que l'on ait également mesuré le gradient de concentration de $CO_2$, $\frac{dc}{dz}$ $\left( \Phi_{CO_2} = k \frac{dc}{dz} \right)$. La méthode s'appliquera aussi bien à la diffusion du $CO_2$ de l'air susjacent, à la partie supérieure de la culture qu'à la diffusion du $CO_2$ dans une couche donnée de végétation, depuis l'air de cette couche vers les feuilles. Ce n'est pas le cas de la dernière méthode présentée ci-dessus qui ne peut prévoir que la valeur du flux de $CO_2$ depuis l'air extérieur vers la culture si l'on connaît les gradients de $CO_2$ et de vapeur d'eau au-dessus de cette culture.

Pour obtenir l'assimilation nette de la végétation, il est également nécessaire de déterminer le flux de $CO_2$ entre le sol et les feuilles inférieures du couvert végétal.

Enfin, compte tenu de l'impératif fixé, à savoir l'étude de l'assimilation nette d'une culture *in situ*, on n'a pas utilisé le système des grandes enceintes (ces enceintes, en matériau transparent, posées sur quelques plantes de la culture sont traversées par un courant d'air dont on mesure le débit et la différence de masse volumique en $CO_2$ entre l'entrée et la sortie). Un tel système perturbe les échanges dès que les phénomènes de diffusion constituent des facteurs limitants de l'assimilation nette, comme c'est le cas sous fort éclairement. Il offre par contre une grande souplesse, permettant ainsi de multiplier le nombre des traitements étudiés.

### 1.12. *Méthodes reposant sur la réponse photosynthétique des feuilles.*

Un autre moyen de déterminer la quantité de $CO_2$ fixé par la culture est de se placer au niveau des processus physiologiques de photosynthèse et de respiration, de les étudier pour une feuille et de sommer les résultats obtenus d'abord à une tranche de végétation puis à la culture toute entière.

Le choix de l'unité de surface de feuille et non pas d'une unité plus fondamentale comme le chloroplaste par exemple est dû à l'impossibilité de sommation des résultats dans ce cas.

L'expérience montre que l'assimilation nette d'une unité de surface des feuilles dépend essentiellement de son éclairement. Ce dernier facteur est en outre le plus variable des facteurs climatiques pour une culture. Indépendamment de la grande variation diurne (de l'obscurité à la pleine lumière), une feuille ombrée à la base de la végétation reçoit une énergie lumineuse 20 à 30 fois plus faible que celle reçue par une feuille ensoleillée du sommet de la culture. C'est pourquoi cette méthode exige tout

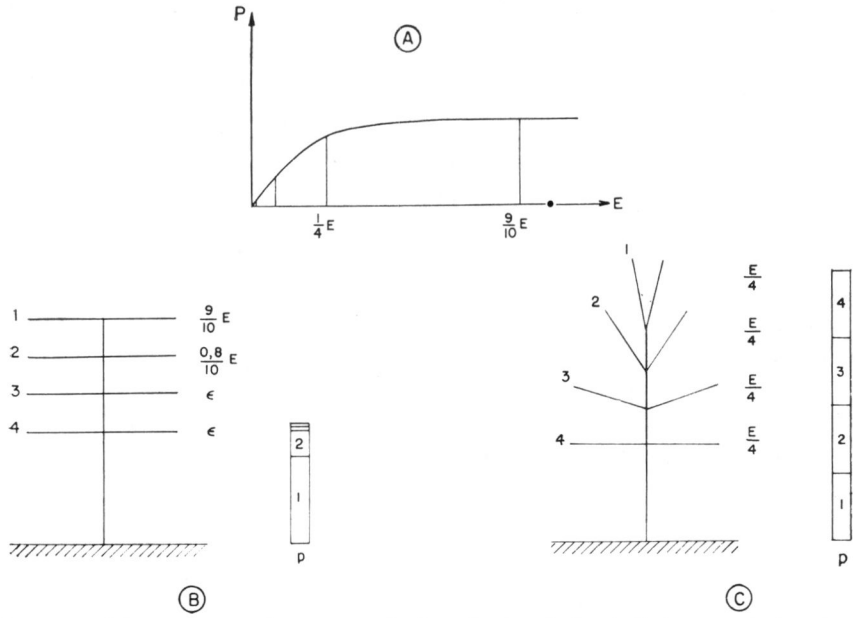



FIG. 2. — *Schéma montrant le processus de détermination de l'assimilation nette de la culture à partir de la réponse photosynthétique de la feuille et de la répartition de l'éclairement*

Le schéma met également en évidence l'influence de la géométrie de la plante sur l'assimilation nette de la culture.

La courbe A indique la photosynthèse de la feuille en fonction de l'éclairement. Cette relation P(E) est déterminée sur des feuilles coupées ou des segments de feuille bien alimentés en eau et placés en chambre d'assimilation. Afin de mettre en évidence l'effet des différences géométriques (entre les cultures B et C), la réponse photosynthétique de la feuille est supposée être la même pour les deux types de culture.

La culture B est un couvert hypothétique constitué de plantes dont les feuilles horizontales se recouvrent les unes les autres, (cas des plantes en rosette). La répartition de l'éclairement E entre les feuilles est indiquée sur la figure. La lumière incidente, dans ce cas, est absorbée essentiellement par la première feuille.

La culture C est constituée de plantes ayant un port de feuilles en éventail (cas d'une culture de betteraves). En outre, on s'est placé dans le cas le plus favorable pour lequel la lumière absorbée par unité de surface foliaire serait la même pour toutes les feuilles.

En reportant les valeurs des éclairements indiqués pour chacune des feuilles des cultures B et C sur le graphique A, on obtient les assimilations de $CO_2$ correspondantes. A partir de ces valeurs, on a construit les rectangles indiqués en B et C. Leur hauteur est proportionnelle à l'assimilation de chacune des deux cultures. Le rôle du port de la plante dans l'assimilation nette d'une culture en ressort clairement.

La démarche indiquée ici schématiquement est celle qui est suivie pour déterminer l'assimilation nette des cultures à partir de la réponse photosynthétique des feuilles (Par. 1. 12.)

d'abord que l'on analyse la répartition de l'énergie solaire entre les feuilles de la culture. En d'autres termes, il s'agit de déterminer la surface des feuilles (on les rapportera toujours à l'unité de surface de sol dans le cas d'une culture couvrante) soumise aux différentes classes d'éclairement que l'on peut définir dans une couche de végétation. On trouve en effet dans une couche de végétation des feuilles ombrées, des feuilles ensoleillées placées parallèlement au rayonnement solaire direct, des feuilles ensoleillées placées perpendiculairement à ce dernier, des feuilles ensoleillées faisant un angle quelconque avec les rayons solaires directs. Cette répartition de l'éclairement solaire dépend essentiellement des caractéristiques des rayonnements solaires eux-mêmes (hauteur du soleil, valeurs respectives des rayonnements solaires directs et des rayonnements solaires diffus, etc.), des caractéristiques géométriques des végétaux et enfin des propriétés optiques des feuilles.

Par ailleurs, l'assimilation d'une feuille de maïs, soumise à un éclairement donné, varie avec :

— son âge et éventuellement d'autres conditions physiologiques ;
— la température de la feuille ;
— la concentration en $CO_2$ de l'air avoisinant ;
— le brassage de l'air à son voisinage ;
— les conditions d'utilisation de l'eau ;
— les conditions d'alimentation minérale ;
— etc.

Pour déterminer cette assimilation nette de l'unité de surface de feuille on mesure les échanges de gaz carbonique entre l'air et la feuille sur des échantillons placés dans des chambres d'assimilation.

En outre, pour tenir compte des principales perturbations apportées par la technique de mesure, on détermine *in situ* et dans la chambre d'assimilation la régulation stomatique et les caractéristiques microclimatiques.

Enfin, on tiendra compte de la fixation ou du dégagement de gaz carbonique par les tiges, les épis et les épillets.

Cette méthode de détermination de l'assimilation nette présente l'avantage de pouvoir être utilisée dans de nombreux cas, y compris avec certaines modifications pour des plantes plus ou moins isolées (verger par exemple). Par contre, la mesure de la réponse des feuilles pose des problèmes d'échantillonnage. Elle demande en outre des phases de calcul longues et nécessite de ce fait l'emploi d'un ordinateur mais on peut raisonnablement espérer tirer quelques règles simplificatrices que l'on pourra ensuite généraliser.

### 1.2. — *Utilisation de l'eau*

L'eau est un facteur de production déjà essentiel dans les régions sèches. On a vu qu'il prendrait une importance croissante dans les régions industrialisées au climat plus humide.

L'eau intervient sur la physiologie des plantes de multiples manières. C'est un constituant de la matière vivante ; son transfert en phase liquide du sol vers les feuilles assure l'apport des matières minérales nécessaires aux réactions physiologiques ; sa vaporisation au niveau des feuilles est un terme déterminant du bilan énergétique et par conséquent de la température de l'organe. Elle détermine en partie le degré d'ouverture des stomates et agit directement de ce fait sur les échanges de gaz carbonique. D'autres faits de ce type pourraient encore être avancés.

L'étude de l'utilisation de l'eau à l'échelle d'une plante ou d'une culture ne peut être conduite qu'en resituant telle ou telle étude partielle dans le continuum sol-plante-atmosphère. Le moteur du mouvement est la diffusion de l'eau en phase vapeur dans l'atmosphère, généralement non saturée au voisinage du sol. Sous cet effet, un gradient de potentiel s'établit, en phase liquide, depuis les feuilles jusqu'au sol.

A côté de ce circuit principal, des échanges hydriques se font avec les tissus où l'eau participe aux activités biologiques.

De ce schéma général, on retiendra dans un premier temps les quelques aspects suivants :

— variations de l'évapotranspiration en fonction des facteurs climatiques et du couvert végétal;

— influence des facteurs climatiques sur la régulation stomatique des feuilles *in situ*, régulation qui intervient directement sur les flux de gaz carbonique et d'eau;

— influence de la transpiration et de la régulation stomatique sur la température des organes et en particulier des feuilles;

— variation de la teneur en eau des feuilles au cours de la journée.

Ultérieurement, on espère aborder d'autres points. Ils concernent la diffusion de l'eau dans le sol sous la culture de maïs en fonction de l'enracinement et l'étude de la diffusion de l'eau en phase liquide des plants de maïs en place.

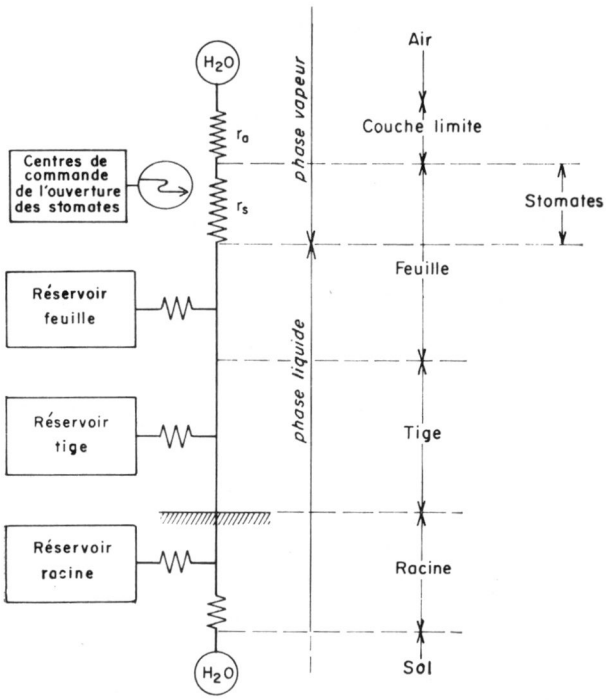



FIG. 3. — *Les transferts hydriques à travers la plante*

Le sol, la plante et l'atmosphère forment un « continuum » à travers lequel se font les transferts d'eau liquide et de vapeur d'eau. Sous l'effet d'un pompage dû à la transpiration, l'eau liquide passe du sol dans les racines, les tiges puis dans les feuilles. A ce niveau, l'eau s'évapore le long des parois des cellules délimitant les cavités sous-stomatiques et les méats, puis elle diffuse sous forme vapeur à travers les stomates, la couche limite, puis l'air. La diffusion de l'eau liquide ne se traduit pas par un mouvement de la totalité de la masse d'eau présente dans les cellules ; le transfert se fait essentiellement dans les vaisseaux et les parois cellulaires. Tout se passe comme si l'eau présente dans les cellules était contenue dans des « réservoirs » placés en dérivation le long du circuit principal. Au voisinage de chaque stomate, quelques cellules formeraient un « organe » particulier qui commanderait l'ouverture ou la fermeture des stomates.

L'évapotranspiration est déterminée soit directement sur évapotranspiromètre pesable soit indirectement par la détermination des coefficients de transfert et des profils de masse volumique en vapeur d'eau au-dessus et au sein de la culture. La détermination des coefficients de transfert a déjà été évoquée à propos de la diffusion du gaz carbonique. On retrouve à ce propos le caractère très général des méthodes

reposant sur l'analyse de la diffusion en régime turbulent. L'étude de l'évapotranspiration d'une culture peut être aussi menée à partir de la température des feuilles et de la valeur de leurs résistances stomatiques. Ces deux termes dépendent beaucoup de l'éclairement solaire ; aussi cette méthode fera-t-elle appel (comme pour l'assimilation du $CO_2$) à l'étude de la répartition des rayonnements dans le couvert (§ 1.12).

### 1.3. — *Analyse du microclimat dans la culture*

La végétation modifie les données climatiques extérieures et crée en son sein et à son voisinage un microclimat particulier. L'interception du rayonnement solaire, le freinage mécanique des mouvements d'air, la transpiration des feuilles sont autant de processus qui agissent sur les caractéristiques de l'air avoisinant et sur la température des organes. Or la végétation est un monde où se déroulent de nombreux processus physiologiques ; les méristèmes de la plante, les animaux ou autres végétaux qui y vivent sont soumis à ce microclimat. La caractérisation de ce microclimat et par la suite la prévision de ce qu'il peut être dans telle ou telle culture compte tenu des données météorologiques extérieures et des caractéristiques du couvert, sont nécessaires aux études menées par d'autres spécialistes.

Déjà les mesures nécessaires à la détermination de l'assimilation nette du gaz carbonique et à l'utilisation de l'eau fournissent de nombreuses données. Toutefois, le plus important est d'analyser et d'expliquer les résultats afin de savoir les prévoir. C'est pourquoi la prévision des profils de température de l'air et des organes, de masse volumique en vapeur d'eau, de rayonnement visible, proche infrarouge et total, de gaz carbonique et de vent ou de turbulence est un objectif à atteindre.

## II. — LES MOYENS D'INVESTIGATION

Afin de réaliser ces différents objectifs, les chercheurs intéressés se sont concertés et ont adopté de travailler ensemble pendant la période de végétation ou une partie de celle-ci sur un dispositif commun. Ce dispositif expérimental, situé à La Minière, est implanté, en situation de plaine dégagée, au sud de Versailles ; il est utile de préciser les moyens d'investigation qu'il comporte.

### 2.1. — *La présentation du dispositif*

Le dispositif occupe une parcelle de 2,6 ha. Il comprend un parc agrométéorologique de référence, sur gazon et fétuque, un laboratoire rassemblant les différents appareils d'enregistrement En dehors de cette infrastructure, 11 évapotranspiromètres pesables, enregistreurs, de grande capacité (de 5 tonnes à 15 tonnes) y sont installés. Leur sensibilité varie de 0,03 à 0,3 mm, selon les modèles. Huit appareils dont le plus sensible (0,03) sont implantés dans la culture de maïs, les autres étant sur gazon. Une partie de la parcelle est soumise à l'irrigation par aspersion, commandée automatiquement par un évapotranspiromètre et fonctionnant la nuit pour que les mesures ne soient pas perturbées.

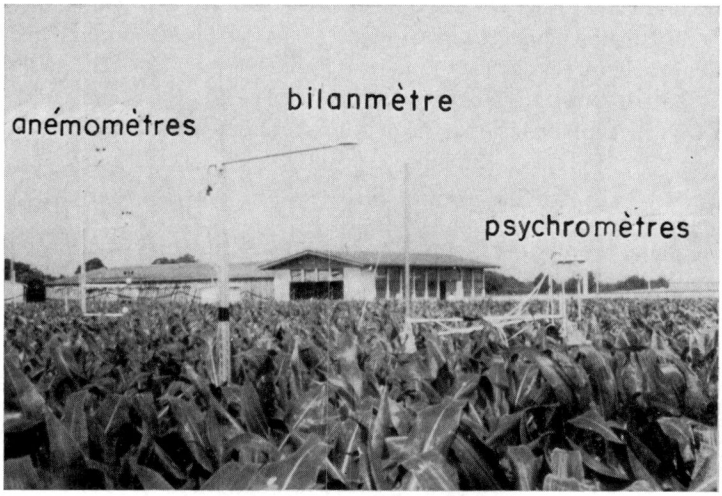



FIG. 4. — *Vue du dispositif au mois de juillet*

On distingue au premier plan les capteurs de mesure (à gauche, mat avec anémomètre ; au centre, bilanmètre ; à droite, psychromètres) placés au milieu de la culture de maïs et, à l'arrière plan, le laboratoire de campagne où sont regroupés les appareils de mesure.

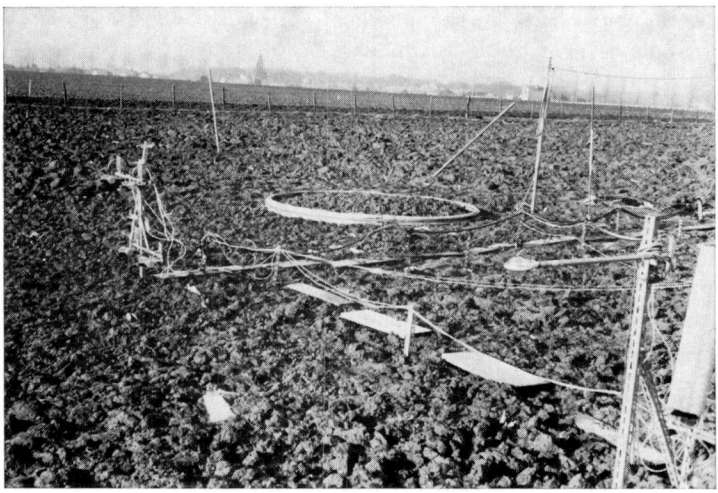


FIG. 5. — *Vue du dispositif en hiver*

On distingue, au centre, la partie supérieure de l'évapotranspiromètre sensible. Cet appareil disparaît sous la végétation en été. On retrouve également des psychromètres (à gauche) et un bilanmètre (à droite) ; ils fournissent à cette saison les éléments nécessaires à l'étude du bilan d'énergie d'un sol nu.

### 2.2. — *Les mesures*

On a vu que les objectifs étant fixés, des analyses théoriques permettaient, dans les opérations les plus complexes, de préciser l'ensemble cohérent (dans le cadre des modèles retenus) des mesures à faire simultanément. La façon de faire cette mesure

et la manière de l'insérer dans une phase de calcul se trouvent dès lors plus ou moins imposées par cette étude théorique préalable.

2.21. *Détermination des densités de flux.*

On a vu qu'il s'agissait de mesurer la diffusion dans l'air, du gaz carbonique, de la vapeur d'eau et parfois de la chaleur. Ces mesures reposent sur celles des coefficients de transfert et sur celles des profils de masse volumique en gaz carbonique et en vapeur d'eau et sur les profils de température (air et végétation) respectivement. Les déterminations du coefficient de transfert font appel aux méthodes évoquées ci-dessus (§ III). Par ailleurs, un dispositif simplifié, indépendant, relatif à la méthode du bilan d'énergie est spécialement étudié et confronté aux autres méthodes, en vue d'être vulgarisé. Enfin, rappelons que les évapotranspiromètres fournissent directement par pesée la densité de flux de vapeur d'eau qui diffuse de la végétation vers l'atmosphère.

2.22. *Mesure des rayonnements d'origine solaire.*

Les rayonnements d'origine solaire, interceptés par la culture couvrante, peuvent être caractérisés de multiples manières. Compte tenu des objectifs poursuivis, on s'attachera à l'analyse et à la mesure :

— des rayonnements diffus descendants dans la végétation ;
— des rayonnements diffus ascendants dans la végétation ;
— du rayonnement solaire direct ;
— des surfaces relatives des taches de soleil aux différents niveaux du couvert végétal ;

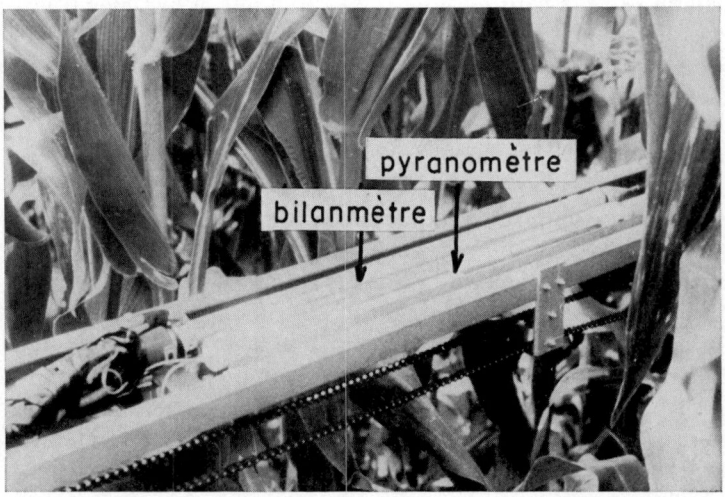



FIG. 6. — *Mesure des rayonnements dans la végétation*

Compte tenu de l'hétérogénéité de l'éclairement d'origine solaire et du rayonnement net dans la végétation, on est conduit à mesurer les valeurs moyennes en déplaçant des capteurs (pyranomètres, bilanmètres linéaires et cellules), sur un chariot se déplaçant le long d'un double rail (6 mètres de longueur).

— des surfaces moyennes de ces taches et de leur vitesse de déplacement (course apparente du soleil et vibrations dues au vent) ;

— de la composition spectrale de la lumière solaire, incidente et réfléchie, à l'ombre et à l'emplacement des taches de soleil, aux différents niveaux du couvert.

Par ailleurs, au début de la végétation, l'interception des rayonnements solaires par les jeunes plantules de maïs sera l'objet d'une étude particulière.

2.23. *Caractéristiques géométriques du couvert.*

Les caractéristiques géométriques du couvert végétal (densité de surface foliaire, inclinaison et azimut des feuilles, largeur moyenne des feuilles, dimension et répartition des tiges, etc.) doivent être déterminées afin de permettre l'analyse :

— de la répartition de l'énergie solaire entre les feuilles avec toutes ses conséquences sur les profils microclimatiques et les densités de flux de $CO_2$, de $H_2O$, de chaleur,

— des obstacles aux échanges turbulents créés par la végétation.

Ces caractéristiques géométriques sont influencées par la variété, la densité de semis, les conditions de croissance. Associées aux mesures d'augmentation de matière sèche des épis, des feuilles, des tiges et parfois des racines, l'évolution des données géométriques au cours du temps est un moyen de préciser l'évolution de la population végétale.

Ces mesures essentiellement manuelles sont longues et fastidieuses. Elles sont cependant indispensables à l'analyse de tout phénomène dans le couvert végétal.

2.24. *Caractéristiques physiologiques.*

La réponse photosynthétique des différentes feuilles de la culture à un éclairement donné, en fonction de l'âge notamment, est nécessaire à la détermination de l'assimilation nette de la culture (§ 1.12). On a vu que la méthode utilisée était celle des chambres d'assimilation dans lesquelles on place des segments de feuille bien alimentés en eau. Dans ces mêmes chambres on mesure également les assimilations nettes des tiges, épis et épillets.

On cherchera à déterminer, pour le maïs, les valeurs des différents paramètres caractéristiques de l'assimilation nette de la feuille (CHARTIER, 1966, in : *Annales de Physiologie végétale de l'I.N.R.A.* ) :

— le rendement lumineux maximal de la photosynthèse ;

— les différentes résistances à la diffusion (dans l'air, à travers les stomates, en phase liquide) et la résistance à la carboxylation.

Par ailleurs, compte tenu de l'importance de la diffusion en phase gazeuse dans le cas des graminées d'origine tropicale comme le maïs, la diffusion du $CO_2$ et de la vapeur d'eau est étudiée séparément pour les deux faces de la feuille, supérieure et inférieure.

La valeur de la résistance stomatique à la diffusion des gaz ($CO_2$ et vapeur d'eau) dépend notamment :

— de l'éclairement auquel la feuille est soumise à un instant donné et de celui qui a précédé (régime permanent, phases d'ouverture et de fermeture) ;

— des conditions hydriques actuelles et de celles des heures précédentes et des jours précédents.

L'étude de l'influence de la lumière et de l'eau sur la résistance stomatique a donc été menée *in situ* et dans la chambre d'assimilation. Les résultats obtenus constituent des éléments essentiels dans l'étude de la dynamique de l'eau (§ 1.2). Par ailleurs, ils permettent de vérifier que la méthode de détermination de l'assimilation nette de la culture reposant sur la mesure de la photosynthèse de la feuille en chambre d'assimilation est applicable (§ 1.12).

Enfin, la variation de la teneur en eau en fonction de l'heure du jour et des conditions climatiques permet d'apprécier le rôle tampon de la plante au point de vue hydrique et de rechercher le déterminisme de la régulation stomatique d'origine hydrique.

La croissance en matière sèche de la culture, enfin, permet de recouper les résultats des données d'assimilations nettes obtenues sur une longue période. Elle constitue aussi l'indication globale permettant de situer chaque expérience dans l'ensemble de la phase de végétation.

## CONCLUSIONS

Cette présentation sommaire des objectifs généraux et des mesures entreprises visait uniquement à fournir le cadre dans lequel se place tel ou tel travail particulier et à introduire la série des articles qui expliciteront les différents points évoqués.

Un travail de synthèse de cette nature doit déboucher sur le plan pratique par l'usage que feront les différents spécialistes intéressés des analyses et méthodes mises au point. C'est dire que le souci de proposer des méthodes simplifiées dès qu'un résultat clair est obtenu est impératif. Certains résultats resteront néanmoins toujours délicats à obtenir ; dans ce cas, c'est vers la constitution d'équipes interdisciplinaires qu'il faudrait s'orienter.

Ces travaux débouchent sur une série d'autres activités faisant ou non l'objet de recherches dans tel ou tel autre laboratoire. Tout d'abord, à court terme et dans le même esprit, il est possible d'étendre les résultats relatifs à une culture couvrante et obtenus le plus souvent par ciel totalement clair ou complètement couvert. L'analyse de l'assimilation nette, de l'utilisation de l'eau et du microclimat doit être faite dans des couverts discontinus (jeunes plantules de maïs, vergers, etc.) et par temps variables (passages nuageux) si fréquents en climat tempéré, subhumide. Les travaux peuvent être ensuite développés à des échelles différentes. C'est par exemple le cas de la diffusion du $CO_2$ en phase liquide au sein des cellules de la feuille. C'est aussi l'étude du bilan d'énergie et des transferts de vapeur d'eau à l'échelle régionale. Enfin, l'étude des liens entre d'une part, l'assimilation nette, l'utilisation de l'eau, le microclimat et d'autre part, les phénomènes de développement du végétal est nécessaire à la compréhension de l'action des facteurs du climat sur la production végétale et donc à leur maîtrise.

*Reçu pour publication en mars 1971.*

## SUMMARY

### NET ASSIMILATION, WATER USE AND MICROCLIMATE OF A MAIZE CANOPY
### I. — OBJECT OF THE WORK AND PRESENTATION OF THE EXPERIMENTAL FIELD « OF LA MINIÈRE »

The first article of this series concerns only the setting up of the relationships between the different studies about net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy.

Transfer coefficient of $CO_2$, water and heat in the air are measured simultaneously by :

— aerodynamic method ;
— energy budget method ;
— use of the diffusion of radioactive thoron ;
— weighable lysimeter with a high sensitivity.

With additional measurements of $CO_2$ and water profiles, net assimilation and evapotranspiration fluxes can be obtained.

Net assimilation is also determined by means of simultaneous measurements of the solar radiation partition among the leaves and the net assimilation of the unit leaf area and other organs.

Studies about water in the soil-plant-atmosphere continuum are now limited to stomata regulation and leaf water content.

Microclimate inside the canopy is studied in order to determine the relationships between climate, foliage arrangement and physiological processes.

Temperature of the organs of the plant is considered as an important factor.

Finally, the technical arrangements of the experimental field are presented.



## ZUSAMMENFASSUNG

### REINE ASSIMILIERUNG, VERWEHRTUNG DES WASSERS UND MIKROKLIMATOLOGIE EINES MAISFELDES

### I. — ZIELE UND BESCHREIBUNG DES EXPERIMENTALEN VERFAHRENS VON LA MINIÈRE

Das begrenzte Ziel dieses ersten Artikels der Serie « Reine Assimilierung, Verwehrtung des Wassers und Mikroklimatologie eines Maisfeldes « besteht in der Beschreibung der verschiedenen zusammengehörenden Untersuchungen, die sich auf das « La Minière-Verfahren » beziehehn, um dem Leser die Würdigung des Gesamtproblems zu ermöglichen.

Die reine Assimilierung und die Verdampfungsausschwitzung werden einerseits mit Hilfe der in der Luft auftretenden Profile $CO_2$ und $H_2O$, anderseits durch die Bestimmung des Koeffizienten für Turbulenztransfer berechnet.

Die Verdampfungsausschwitzung wird kontinuierlich mit Hilfe eines Verdampfungsausschwitzungsmessapparates aufgezeichnet. Die reine Assimilierung der Kultur wird mittels einer kombinerten Method auf Grund der Verteilungsanalyse der Sonnenstrahlen zwischen den Blättern und der reinen Assimilierung der Oberflächeneinheit von Blättern und anderen Organen festgestellt.

Ausser den Verdampfungsaussch witzungsberechnungen wird zurzeit die Untersuchung des Diffusionsvermögens des Wassers in dem « Continuum » Boden-Pflanze-Atmosphäre auf Messungen der Porenregulierung und Veränderung des Wassergehaltes der Blättner begrenzt.

Die Bestimmung des Mikroklimas in der Bodenbedeckung und namentlich der Temperatur der Organe in Abhängigkeit des Klimas und der Eigenschaften der Bodenbedeckung ist in Angriff genommen.

In diesem Artikel werden die angewandten Techniken und die eingesetzten Mittel kurz erläutert.

## РЕЗЮМЕ

Чистое усвоение, влагопотребление и микроклиматология кукурузного поля. I. Цели и описание экспериментальной диспозиции в ла миньер.

Ф. ШАРТЬЕ, А. ПЕРРЬЕ, М. ВЕРБРЮГГЕ.

Эта первая работа серии « Чистое усвоение, влагопотребление и микроклиматология кукурузного поля», описывает разные согласованные изучения предпринятые на диспозитиве Ла Миньер, дабы помочь читателю разобраться в совокупности работ проведенных на эту тему.

Чистое усвоение и эвапотранспирация рассчитываются, с одной стороны, при помощи профилей $CO_2$ и $H_2O$ в воздухе, и с другой — определения коэффициентов переноса турбулентности.

Эвапотранспирация постоянно регистрируется с помощью эвапотранспирометра. Чистое усвоение культурой изучается, кроме того, с помощью комбинированного анализа распределения солнечного излучения между листьями и чистого усвоения единицей листовой поверхности и других органов.

Изучении диффузии влаги в совокупности почва — растение — атмосфера в данный момент — ограничено, за исключением измерния эвапотранспирации, изучением регуляции устьиц и изменений содержания воды в листьях.

Приступается также к определению микроклимата в растительном покрове, и в частности температуры органов, в зависимости от климата и от характера покрова. В данной работе разбираются также применявшиеся технические приемы и использованные рессурсы.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (4), 383-396.

# ASSIMILATION NETTE, UTILISATION DE L'EAU ET MICROCLIMATOLOGIE D'UN CHAMP DE MAÏS

## II. — ÉCLAIREMENT D'UN PLAN HORIZONTAL AU-DESSUS ET AUX DIFFÉRENTS NIVEAUX DE LA CULTURE

R. BONHOMME*, P. CHARTIER et C. VARLET-GRANCHER*

*Station centrale de Bioclimatologie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

RÉSUMÉ

L'assimilation nette de la culture de maïs peut être déterminée à partir de la répartition de l'énergie solaire entre les feuilles. On a montré (CHARTIER, 1969) que l'on pouvait calculer l'éclairement des feuilles elles-mêmes à partir de l'éclairement des plans horizontaux aux différents niveaux de la culture.

Par temps couvert, il suffit de connaître les profils de rayonnements ascendants (fig. 4) et descendants (fig. 5) ainsi que les valeurs du rayonnement global incident et du rayonnement réfléchi.

Par temps ensoleillé, l'hétérogénéité des rayonnements descendants est telle qu'il faut étudier séparément la pénétration du rayonnement solaire direct (éclairement et profils des surfaces des taches de soleil, fig. 7) et des rayonnements diffus ascendants et descendants (fig. 6 et 9). Pour mesurer le rayonnement diffus descendant, on utilisera des écrans pare-soleil (fig. 8).

La valeur moyenne de l'éclairement d'un plan horizontal peut être calculée à partir des valeurs indiquées ci-dessus. Cette valeur est comparée avec celle obtenue à l'aide d'un pyranomètre placé sur un chariot mobile (fig. 10).

## I. — INTRODUCTION

L'étude de l'assimilation nette d'une culture nécessite la connaissance de l'énergie incidente et de sa répartition à l'intérieur du couvert végétal (CHARTIER, PERRIER et VERBRUGGHE, 1971). CHARTIER (1969) a montré qu'il est important de faire la part des différentes formes de rayonnement dans la végétation. Aussi avons-nous mesuré les rayonnements solaires directs, diffus, et réfléchis, reçus sur une surface horizontale au-dessus et aux différents niveaux d'une culture de maïs.

* Adresse actuelle : Station de Bioclimatologie du C. R. A. A. G., Domaine Duclos, GUADELOUPE.

## II. — MATÉRIEL ET TECHNIQUES

La parcelle réservée aux mesures couvre une superficie de 0,5 ha au milieu d'un champ de 2,5 ha. La variété employée *I. N. R. A. F7 × EP1*, hybride simple, est semée à raison de 80 000 pieds par hectare. Un dispositif d'irrigation assure aux plantes une réserve hydrique toujours satisfaisante.

Au-dessus de la culture, nous appelons :

— $D_0$ : l'éclairement énergétique du au rayonnement diffusé par le ciel ; sa mesure est effectuée à l'aide d'un pyranomètre de Moll et d'une bande pare-soleil de type Schuepp;

— J sin $h$ : l'éclairement énergétique fourni par le rayonnement solaire direct sur un plan horizontal, $h$ étant la hauteur du soleil;

— $G = J \sin h + D_0$ : le rayonnement global ; il est mesuré par un pyranomètre de Moll;

— $a$, l'albédo : rapport entre l'énergie solaire réfléchie par la culture $A_0$ et le rayonnement global incident ; sa mesure est réalisée à l'aide de deux pyranomètres dont l'un mesure G, et l'autre, dirigé vers le bas, est placé à un mètre au-dessus de la culture (albédomètre).

Dans le couvert végétal, les mesures d'éclairement énergétiques sont effectuées par des pyranomètres linéaires (COMBRES *et al.*, 1970). L'évaluation des rayonnements diffus descendants dans la végétation nécessite en outre l'emploi de caches pare-soleil.

La mesure de la pénétration du rayonnement solaire direct est faite grâce à la technique des photographies hémisphériques (BONHOMME, 1970). Cette même technique permet d'estimer $f$ l'indice foliaire (feuille, tiges et inflorescences) compris entre un niveau donné et le sommet de la végétation.

F l'indice foliaire total, compris entre la surface du sol et le sommet de la végétation, est légèrement supérieur à 3.

Les caractéristiques du feuillage de la culture étudiée sont indiquées figure 1 ; profil d'indice foliaire $f$, fréquences d'inclinaison des feuilles. Les feuilles ont la même probabilité de prendre n'importe quel azimuth. Les rangs, marqués dans la partie supérieure de la végétation, sont orientés nord-sud.

## III. — RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT ET RÉFLÉCHI AU-DESSUS DE LA CULTURE

### 3.1. — *Variations de G et de $D_0$*

La figure 2 montre, par ciel clair, l'évolution journalière de G, ainsi que de ses composantes $D_0$ et J sin $h$. Il est possible de caractériser cette évolution par les variations du rapport $D_0/G$ ; on a montré par ailleurs que celui-ci :

— décroît lorsque la hauteur du soleil $h$ augmente,

— croît avec le trouble atmosphérique,

— est égal à 1 par ciel couvert $G = D_0$.

### 3.2. — *Variations de l'albédo* a

Des variations de l'albédo par ciel clair, en fonction de l'indice foliaire et pour différentes hauteurs de soleil, sont portées sur la figure 3. On remarque que :

— l'effet de la hauteur du soleil, marqué pour les valeurs les plus faibles, est encore net pour des hauteurs supérieures à 40°. On notera que les rangs orientés Nord-Sud sont apparents dans la zone supérieure de végétation (épillets) pour $F > 3$. Or un changement de hauteur s'accompagne aussi d'un changement de l'azimut du soleil par rapport aux rangs, ce qui peut expliquer les variations d'albédo pour les hauteurs de soleil élevées ;

— l'effet de l'indice foliaire est manifeste pour les indices foliaires inférieurs à 2.

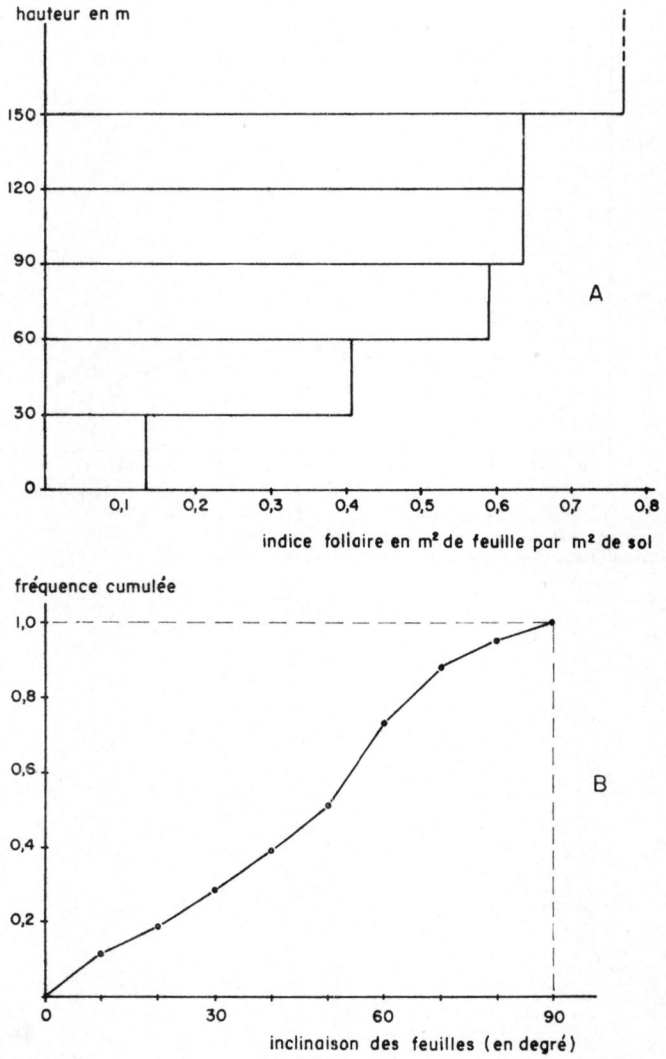



FIG. 1. — *Caractéristiques géométriques de la culture de maïs étudiée*
Courbe A — profil d'indice foliaire
Courbe B — fréquence cumulée des inclinaisons des feuilles de la culture (d'après ARCHER et VERBRUGGHE, 1971)

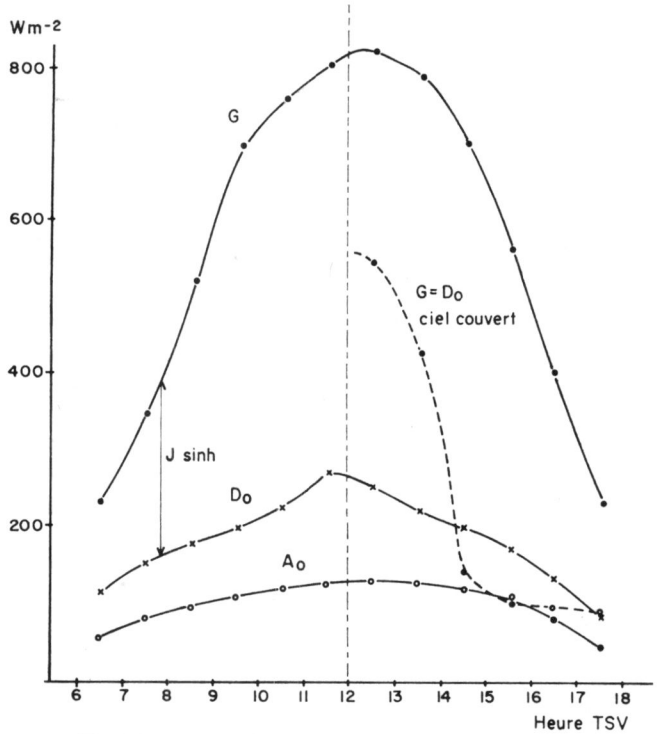



FIG. 2. — *Variations journalières de G, Do, Ao, par ciel clair* (traits pleins) *du 15-7 au 15-8 à La Minière près de Versailles* (49° latitude Nord). *Variation journalière de Do* (égal à G) *par ciel couvert, nuages peu épais, le 14-7 à La Minière.*

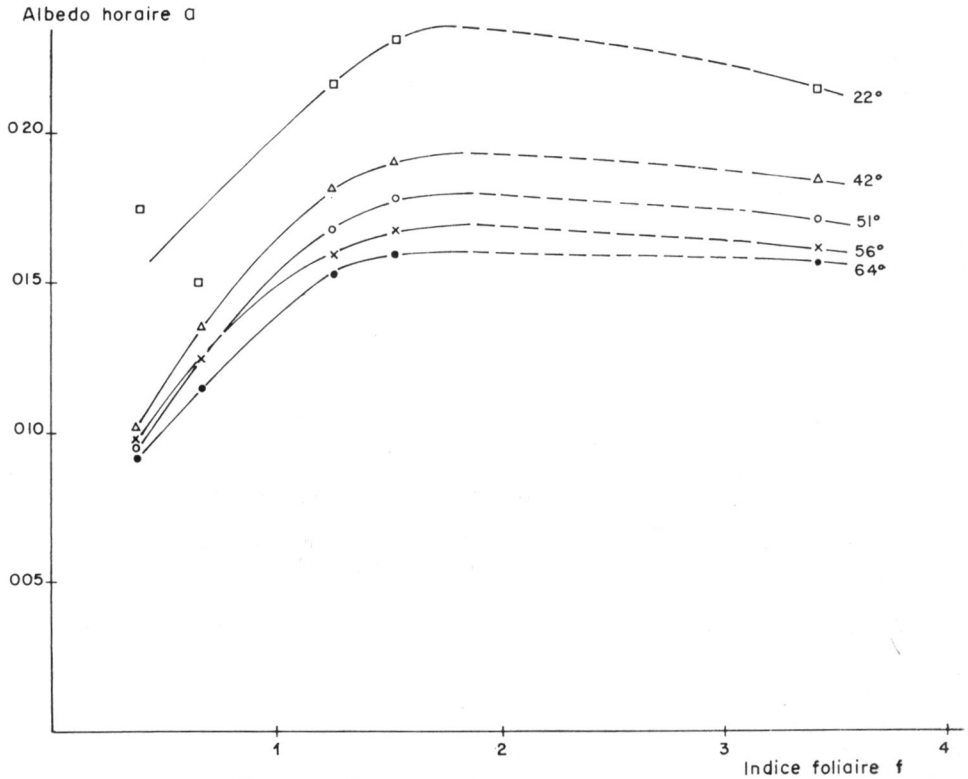



FIG. 3. — *Variation de l'albédo d'une culture de maïs en fonction de l'indice foliaire pour différentes hauteurs de soleil.*

## IV. — ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE AUX DIFFÉRENTS NIVEAUX DE LA CULTURE

Nous considérons l'éclairement énergétique reçu sur un plan horizontal, à un niveau de la culture, provenant des couches inférieures (rayonnement diffus ascendant) et supérieures (rayonnement descendant). Les mesures relatives au cas d'un ciel couvert $G = D_0$ et d'un ciel clair sont discutées successivement.

### 4.1. — *Cas d'un ciel couvert*

4.11. *Profil de rayonnement ascendant.*

Nous caractérisons le rayonnement ascendant en un point dans la végétation (correspondant à un indice foliaire $f$) par le rapport entre l'éclairement énergétique A au niveau considéré (mesuré par un pyranomètre dirigé vers le bas) et celui $A_0$ reçu par un pyranomètre placé à 1 mètre au-dessus de la culture et également dirigé vers le bas (albédomètre). La figure 4 tracée à partir de données obtenues par ciel

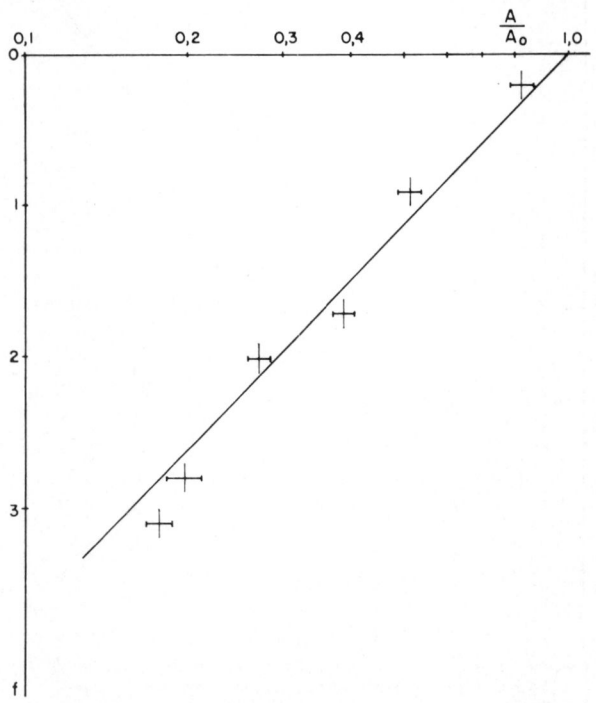



FIG. 4. — *Variation du rapport A/Ao entre l'énergie ascendante à un niveau et l'énergie réfléchie par l'ensemble de la culture. Ciel couvert. Ensemble des mesures effectuées pour différentes heures.*

couvert, et pour différentes heures de la journée, montre que ce rapport varie exponentiellement avec l'indice foliaire :

$$\frac{A}{A_0} = e^{-K'f}$$

avec K′ = 0,61, K′ étant un coefficient qui tient compte à la fois de l'extinction des rayonnements diffus ascendants et de la réflexion des rayonnements diffus descendants. K′ dépend des caractéristiques géométriques du feuillage et des propriétés optiques des feuilles.

Le profil obtenu est pratiquement indépendant de la hauteur du soleil, donc de l'heure du jour.

Ce résultat permet de déterminer à tout instant le profil des rayonnements ascendants dans une culture déterminée à condition de mesurer $A_0$ et de connaître la valeur de K′. On notera que l'on retrouve expérimentalement une loi analogue à la loi de Beer mise en évidence pour les rayonnements descendants (MONSI et SAEKI, 1953).

4.12. *Profil de rayonnement descendant.*

Le profil des rayonnements descendants, par ciel couvert, ne comprend évidemment que des rayonnements diffus. Le profil ainsi défini est aussi celui de l'atténuation du rayonnement global dans ce cas.

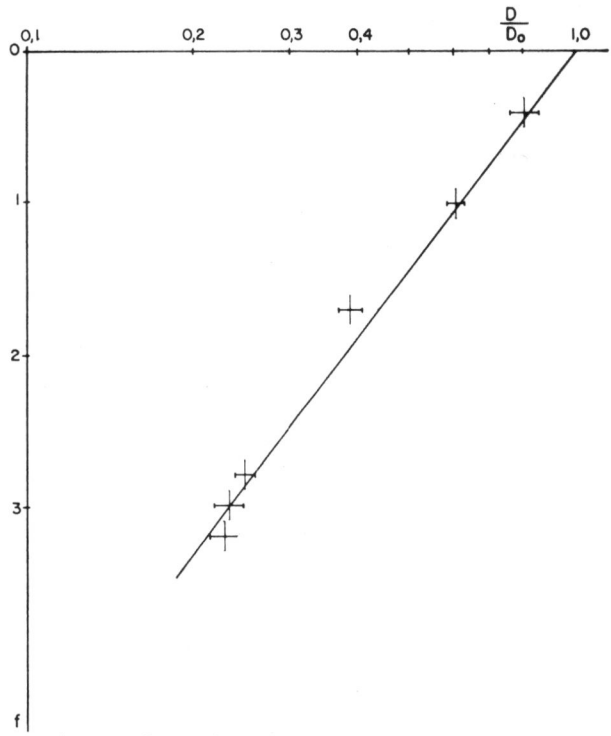



FIG. 5. — *Atténuation en valeurs relatives du rayonnement diffus descendant par ciel couvert. Ensemble des mesures effectuées pour différentes heures.*

Les rapports entre le rayonnement descendant D et le rayonnement au-dessus de la culture $D_0$ sont portés sur la figure 5. Il faut noter la faible dispersion des mesures effectuées pour différentes heures de la journée. Nous retrouvons une atténuation selon une loi exponentielle classique (MONSI et SAEKI, 1953) :

$$\frac{D}{D_0} = e^{-Kf}$$

avec K = 0,48, K étant le coefficient d'extinction des rayonnements diffus descendants.

K dépend des caractéristiques géométriques de la culture et des propriétés optiques des feuilles.

La valeur de K est faible pour les plantes à port érigé (0,3 par exemple) ; elle est au contraire élevée pour les plantes à port horizontal (0,9 par exemple).

Dans le cas de ciel couvert la connaissance de ces deux formes de profil ascendant et descendant permet donc de calculer la répartition de l'énergie dans la culture à chaque instant à partir de la mesure du rayonnement global G et de l'énergie réfléchie au-dessus du couvert $A_0$.

### 4.2. — *Cas d'un ciel clair*

#### 4.21. *Profil de rayonnement ascendant.*

Une présentation analogue à celle du paragraphe 4.11. permet de tracer les courbes de la figure 6. Les profils obtenus varient selon la hauteur du soleil $h$ ; on voit que pour $h < 50°$, l'atténuation en fonction de $f$ est plus marquée que dans le cas du ciel couvert. Le décrochement des profils au sommet de la végétation, par temps ensoleillé, est vraisemblablement dû au port particulier des épillets.

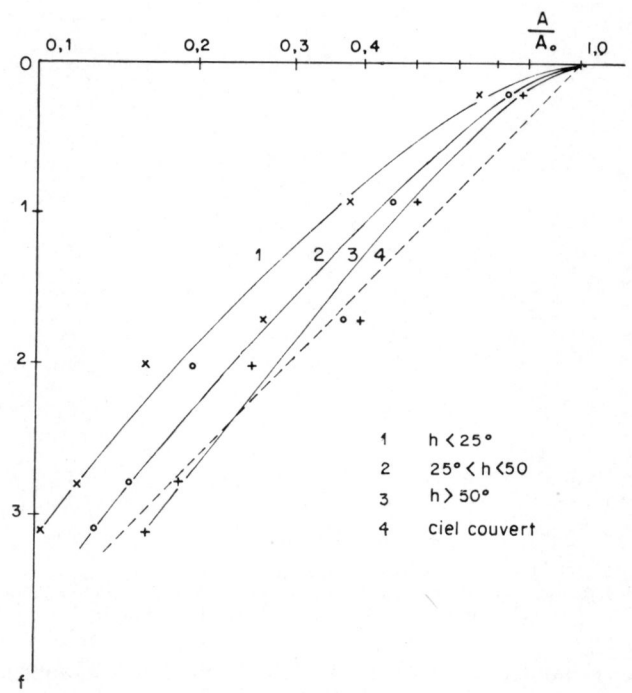



FIG. 6. — *Variation du rapport A/Ao entre l'énergie ascendante à un niveau et l'énergie réfléchie par l'ensemble de la culture. Ciel clair. Cas de différentes hauteurs du soleil h.*

4.22. *Profil de rayonnement global.*

Dans le cas d'un ciel clair, il est peu intéressant d'obtenir une valeur moyenne de l'éclairement à cause de l'hétérogénéité de la répartition de l'énergie à un niveau donné (taches de soleil et zones d'ombre) et des effets très différents sur l'assimilation nette, la transpiration et la température des feuilles. Nous avons donc effectué séparément la mesure de la répartition des taches de soleil et de l'atténuation des rayonnement diffus.

4.221. *Taches de soleil.*

Nous caractérisons l'énergie solaire directe à un niveau donné par l'éclairement d'un plan horizontal dû au rayonnement solaire direct (J sin $h$) et par la surface relative des taches de soleil $s_h$, mesurée sur un plan horizontal à l'aide de photographies hémisphériques (BONHOMME, 1970).

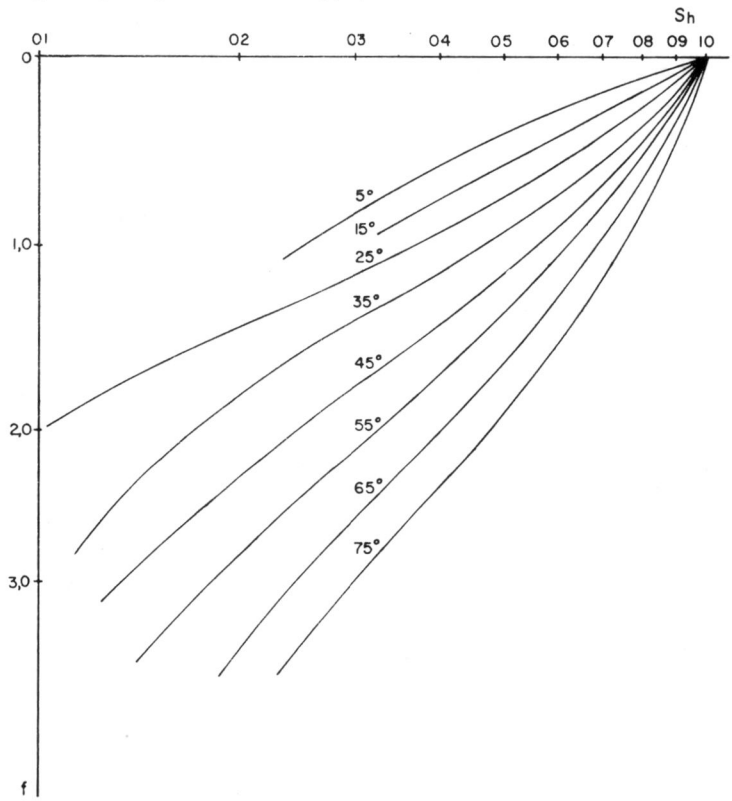



FIG. 7. — *Surface relative des taches de soleil* ($h$) *à différents niveaux dans la culture* (caractérisés par l'indice foliaire $f$) *et pour différentes hauteurs de soleil h en degrés.*

La figure 7 montre les valeurs de $s_h$ obtenues à différents niveaux pour la culture étudiée. CHARTIER (1966) a montré lors d'une étude théorique que la réduction de la surface relative des taches de soleil au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans une végétation suit une loi du type :

$$s_h = e^{-K''f}$$

où K″ est un coefficient d'extinction relatif à la surface des taches de soleil ; K″ dépend de l'inclinaison des feuilles et de la hauteur du soleil. En fait cette relation a été établie pour une végétation dont l'inclinaison des feuilles serait constante et dont la répartition des feuilles dans l'espace serait due au hasard. Ce n'est évidemment pas le cas d'une culture de maïs (fig. 1, en ce qui concerne l'inclinaison). Par ailleurs, dans la partie supérieure de la végétation, l'effet des rangs se marque nettement. Le fait que les courbes obtenues (fig. 7) ne soient pas linéaires peut s'expliquer ainsi.

Connaissant les valeurs du rayonnement direct $J \sin h = G - D_0$, il est possible d'évaluer l'énergie apportée par les taches de soleil sur un plan horizontal.

4.222. *Profil de rayonnement diffus descendant.*

En un point, le rayonnement diffus descendant résulte de la fraction du diffus du ciel $D_0$, incident, transmis au niveau $f$ et des rayonnements solaires directs et diffus, réfléchis ou transmis par les feuilles du couvert végétal situées au-dessus du niveau considéré. La mesure de ces rayonnements diffus nécessite l'emploi d'un système supprimant le rayonnement solaire direct. La mise en place de bande pare-soleil dans un couvert végétal est difficile : aussi nous avons disposé seulement des portions de cette bande (supportées par des mâts) pour assurer un ombrage de pyranomètres linéaires à certaines heures de la journée (fig. 8). Un dispositif de déplacement des instruments de mesure dans un plan incliné selon la latitude permet d'utiliser le système au cours de l'année pour différentes déclinaisons du soleil.

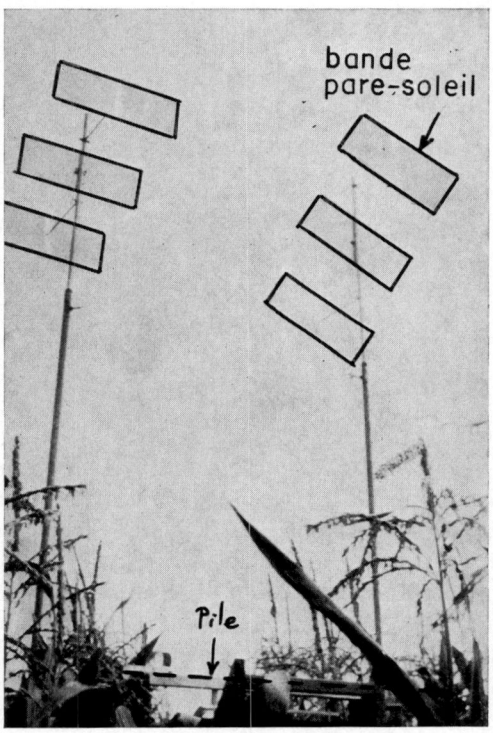



FIG. 8. — *Bandes pare-soleil.*
*Dispositif commun à 3 pyranomètres linéaires placés à 3 niveaux différents.*

La figure 9 montre que les profils de rayonnements diffus descendants (valeurs relatives par rapport au rayonnement diffus du ciel $D_0$) diffèrent selon la hauteur du soleil. Pour des incidences faibles (fig. 9, courbe 1), l'atténuation est marquée et la pente de la courbe représentative est voisine de celle obtenue avec un rayonnement diffus seul (fig. 9, courbe 3). Lorsque la hauteur du soleil augmente ($h$ supérieure à 25 degrés), la dispersion des mesures est plus importante et le profil présente une forme nettement différente. La rediffusion du rayonnement solaire direct intercepté par les feuilles explique la décroissance plus faible obtenue dans ce dernier cas.

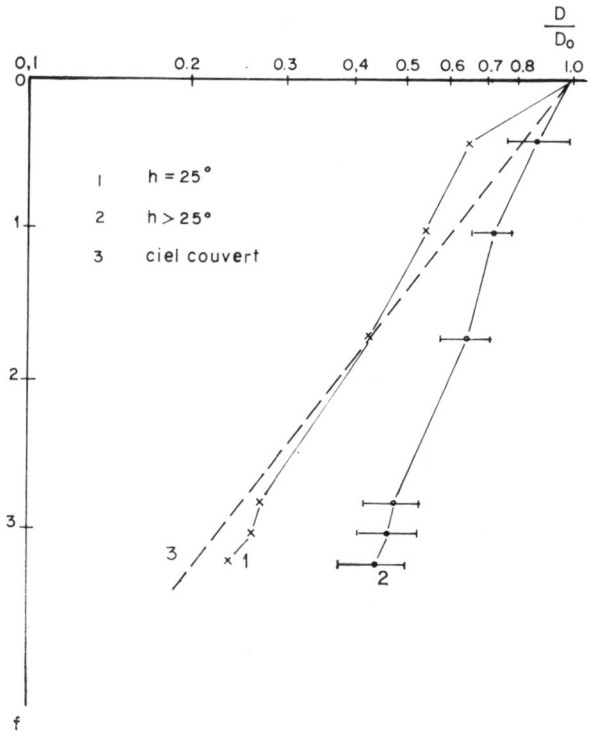



FIG. 9. — *Extinction des rayonnements diffus descendants dans la culture par ciel clair*
1 : $h = 25°$
2 : $h > 25°$
3 : ciel couvert

Connaissant les valeurs du rayonnement global G, du rayonnement diffusé par le ciel $D_0$ (donc de J sin $h = G - D_0$), de l'énergie réfléchie par la culture $A_0$, des coefficients K′ et K et de $s_h$, il est possible de calculer, pour une hauteur de soleil donné, la répartition de l'énergie à l'intérieur du couvert végétal (rayonnements ascendants et descendants). La figure 10 montre l'évolution de tels profils pour des hauteurs de soleil différentes. Il faut remarquer, pour $h$ élevé, l'importance de l'apport énergétique des taches de soleil dans l'éclairement moyen (fig. 10, $h = 60°$, courbe 3).

On détermine l'éclairement moyen I à l'aide de la relation suivante :

$$I = D + s_h \, J \sin h$$

D, $s_h$, J sin $h$ sont mesurés selon les méthodes développées ci-dessus.

Afin de savoir si la détermination de la valeur de l'éclairement moyen à partir de $D_0$, I sin $h$ et $s_h$ était correcte, on a procédé à quelques mesures directes de l'éclairement moyen à deux niveaux dans la même végétation. Les points expérimentaux, représentés sur la figure 10, sont obtenus par déplacement d'un pyranomètre linéaire, placé sur un chariot mobile, le long d'un rail de 6 mètres, au niveau considéré. La valeur moyenne est calculée par intégration de l'enregistrement effectué pendant ce parcours de 6 m. Bien qu'il ne soit pas possible d'extrapoler les mesures à l'ensemble du profil, le bon accord obtenu entre les valeurs mesurées et calculées est encourageant.

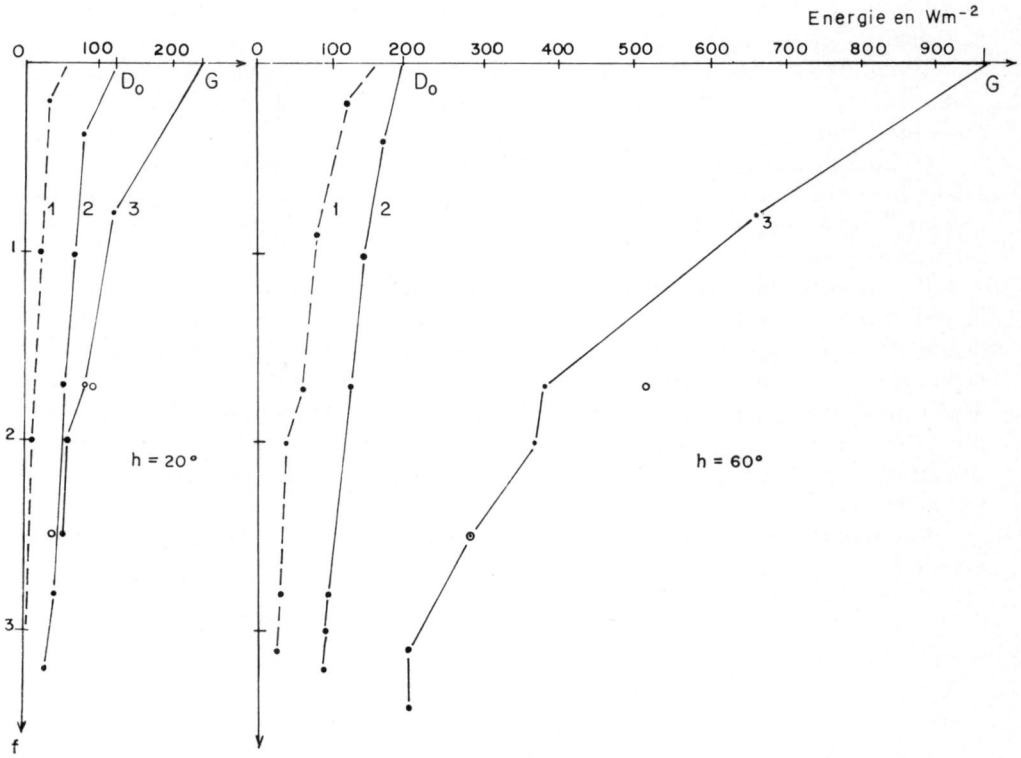



FIG. 10. — *Évaluation des rayonnements ascendants et descendants dans la culture*

1 : rayonnement ascendant A
2 : rayonnement diffus descendant D
3 : éclairement moyen de la face supérieure d'un plan horizontal (diffus descendant et énergie solaire directe à l'emplacement des taches de soleil).
Ciel clair. Cas de deux hauteurs de soleil.
o : Valeurs moyennes mesurées du rayonnement global à deux niveaux.

## V. — CONCLUSION

Pour évaluer l'énergie reçue sur un plan horizontal dans la culture de maïs considérée, il suffit, compte-tenu des figures 4 et 5 (par ciel couvert) 6, 7 et 9 (par ciel clair), de mesurer les rayonnements global G, diffus $D_0$, réfléchi $A_0$ au-dessus de ce couvert végétal.

Dans l'étude de l'assimilation nette d'un champ de maïs, il est nécessaire de connaître l'éclairement non pas d'un plan horizontal, mais celui effectivement reçu par les feuilles aux différents niveaux. Celui-ci peut être calculé à partir des éclairements obtenus selon la méthode décrite précédemment si l'on connaît de plus l'orientation des feuilles dans l'espace (CHARTIER, 1969). Une certaine imprécision entache toutefois les résultats obtenus par ciel clair dans la partie supérieure de la végétation.

Ce mode de calcul présente l'avantage d'évaluer séparément les différentes formes d'énergie transmises dans la culture ; en attribuant un poids relatif à chacune de ces formes, compte tenu de leur composition spectrale (VARLET-GRANCHER, BONHOMME, 1971) il est alors possible de calculer l'efficience photosynthétique de la lumière à un niveau.

Toutefois, ces différents calculs reposent sur des hypothèses dont la vérification doit être un objectif particulièrement important du travail expérimental. C'est ainsi que l'étude de la répartition dans l'espace des feuilles demande à être développée.

L'extension des résultats obtenus aux premiers stade de végétation en vue d'une étude fine de la croissance exige de son côté une analyse de la répartition de l'éclairement dans le cas de plantes d'abord pratiquement isolées, puis qui recouvrent progressivement le sol.

Il reste enfin différentes questions qui sont loin d'être réglées en ce qui concerne la répartition de l'éclairement solaire dans une culture couvrante. Leur intérêt est lié aux conséquences physiologiques que l'on peut en attendre. Par exemple, la durée pendant laquelle une feuille est ensoleillée (surfaces unitaires des taches de soleil et déplacement des taches, vibrations dues au vent, etc.) présente une importance physiologique certaine compte tenu de l'inertie de certains phénomènes (régulation stomatique) ou de l'importance des conditions antérieures sur la réponse de tel ou tel phénomène.

De nombreux développements sont donc à attendre dans l'étude de la répartition de l'énergie solaire dans la végétation.

*Reçu pour publication en mars 1971.*

## SUMMARY

### NET ASSIMILATION, WATER USE AND MICROCLIMATE OF A MAIZE CANOPY
### II. — IRRADIANCE OF HORIZONTAL PLANES ABOVE AND AT DIFFERENT LEVELS INSIDE THE CANOPY

Net assimilation of the canopy can be determined from the solar radiation partition between the leaves. Irradiance of the leaf can be obtained from measurements of irradiances upon horizontal planes and structural characteristics of the plants.

In a cloudy period without direct solar radiation, the profiles of upward (fig. 4) and downward (fig. 5) radiations measured upon horizontal planes are given.

In a sunny period, there is a high heterogeneity of downward radiation, due to the differences between shaded area and sunlit area (sunflecks). The profiles of relative sunfleck area as influenced by solar elevation are presented on fig. 7. Profile of downward diffuse radiation upon horizontal planes must be measured (fig. 9) by means of screens hiding the solarimeters from the direct radiations (fig. 8).

The average value of irradiance upon an horizontal plane can be obtained from these measurements. Comparison with average values obtained from a moving solarimeter is made (fig. 10).

## ZUSAMMENFASSUNG

### REINE ASSIMILIERUNG, VERWEHRTUNG DES WASSERS UND MIKROKLIMATOLOGIE EINES MAISFELDES

### II. — BELEUCHTUNG EINER WAGERECHTEN FLÄCHE AUF DER OBEREN SEITE UND AUF DEN VERSCHIEDENEN EBENEN DER KULTUREN

Die reine Assimilierung der Maiskultur kann, ausgehend von der Verteilung der Sonnenergie zwischen den Blättern, festgestellt werden. Es wurde gezeigt (CHARTIER, 1969) dass es Möglich ist, die Beleuchtung der Blätter selbst ausgehend von der Beleuchtung der wagerechten Flächen bei den verschiedenen Ebenen der Kulturen, zu berechnen.

Bei bedecktem Himmel genügt es, die Profile der aufwärts (Abb. 4) und abwärts (Abb. 5) wirkenden Sonnenstrahlen, sowie die Werte der gesamten Nebenstrahlungen und der Rückstrahlung zu kennen.

Bei sonnigem Wetter ist die Ungleichartigkeit der abwârts wirkenden Strahlen so gross dass das Durchdringen der direkten Sonnenstrahlungen (Beleuchtung und Profile der Flächen der Sonnenflecken,) (Abb. 7) und das Durchdringen der aufwärts und abwärts wirkenden Streustrahlen (Abb. 6 und 9) getrennt untersucht werden müssen. ZurMessung der abwärts wirkenden Streustrahlen werden Sonnenschirme verwendet (Abb. 8).

Der Mittelwert der Beleuchtung einer wagerechten Fläch kann, ausgehend von den obene angegebenen Werten, berechnet werden. Diese Ergebnisse werden mittels eines auf einem Wagen aufgebauten Pyranometers verglichen (Abb. 10).

## РЕЗЮМЕ

Чистое усвоение, влагопотребление и микроклиматология кукурузного поля. II. Освещенность горизонтального плана над культурой и на ее различных уровнях.

Р. БОНОММ, Ф. ШАРТЬЕ, К. ВАРЛЭ-ГРАНШЭ.

Чистое усвоение света культурой кукурузы определяется на базе распределения солнечной энергии между листьями. Раньше было доказано (Шартье 1969), что возможно рассчитать освещенность самих листьев исходя из освещенности горизонтальных планов на различных уровнях культуры.

В облачные дни достаточно знать профили восходящих (Рис. 4) и нисходящих (Рис. 5) излучений, а также и общие величины падающего и отраженного излучений. В солнечную погоду гетерогенность нисходящих излучений такова, что необходимо изучать раздельно проникание прямого солнечного излучения (освещенность и профили площадей солнечных пятен, рис. 7), и рассеянные восходящее и нисходящее излучения (рис. 6 и 9). Для измерения рассеянных нисходящих излучений применяется противо-солнечное экранирование.

Средняя величина освещенности горизонтального плана может быть рассчитана на базе вышеуказанных величин. Она сравнивается с величиной найденной по пиранометру закрепленному на передвижной тележке.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARCHER Ph., VERBRUGGHE M., 1971. Article en préparation.

BONHOMME R., 1970. Surface relative des taches de soleil dans la végétation. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère* ». I. N. R. A., Paris, 99-104.

BONHOMME R., 1970. L'analyse de la surface des taches de soleil, de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne des feuilles à l'aide des photographies hémisphériques. *Colloque sur la réponse des plantes aux facteurs climatiques, Uppsala, 15-20 septembre* (sous presse).

CHARTIER P., 1966. Étude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. agron.*, **17** (5), 571-602.

CHARTIER P., 1969. Assimilation nette d'une culture couvrante. I. Définition d'un schéma d'expérimentation à partir d'une analyse théorique. *Ann. Physiol. vég.*, **11** (2), 123-159.

CHARTIER P., PERRIER A., VERBRUGGHE M., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. I. Objectifs et présentation du dispositif expérimental de La Minière. *Ann. agron.*, **22** (4), 367-381.

COMBRES J. C., BONHOMME P., BALDY C., GOILLOT C., DE PARCEVAUX S., 1970. Un pyranomètre linéaire destiné à mesurer le rayonnement sous couvert végétal. *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère.* I. N. R. A., Paris, 59-70.

MONSI M., SAEKI T., 1953. Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedentung für die Stoffproduktion. *Jap. Bot.*, **14**, 22-52.

VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. III. — Composition spectrale de la lumière dans la culture. *Ann. agron.* (sous presse).

*Ann. agron.*, 1971, **22** (4), 397-424.

# PREMIERS RÉSULTATS SUR L'ALTÉRATION EXPÉRIMENTALE DE ROCHES CALCAIRES ET DOLOMITIQUES

R. DURAND et P. DUTIL

avec la collaboration technique de D. GOBERT et Jacqueline VISSEICHE

*Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne, I. N. R. A., 51 - Fagnières*

## RÉSUMÉ

L'altération de trois roches carbonatées (craie, calcaire dur, dolomie) a été réalisée expérimentalement dans des soxhlets, sous atmosphère de gaz carbonique avec des conditions thermohydriques rappelant celles d'un climat tropical.

Les bilans des exportations montrent que la cohésion des particules carbonatées, c'est-à-dire la dureté de la roche, commande le type d'altération : l'attaque de la craie est essentiellement due à un phénomène physique ; alors que pour le calcaire dur et la dolomie, l'exportation est la conséquence d'un phénomène chimique de dissolution.

Dans les conditions de l'expérience, la dolomie est dissoute plus rapidement que le calcaire dur ; le résultat inverse peut être prévu, à partir des données théoriques, sous climat froid. Cette dissolution de la dolomie oolitique porte préférentiellement sur les plus petits cristaux du ciment dolomitique, et elle n'est pas en relation avec la nature minéralogique du matériau.

Après dissolution de la dolomite, le magnésium est lixivié plus rapidement que le calcium. Il en résulte, au niveau des cortex du reliquat, un enrichissement relatif en carbonate de calcium ; ce carbonate cristallise : c'est le phénomène de dédolomitisation, qui régit le processus de l'altération de la dolomie.

Les composés fersiallitiques évoluent en même temps que les composés carbonatés, et, semble-t-il, selon un processus identique à celui des roches purement silicatées.

En première approximation, on peut conclure, à partir de ces résultats, que si les composés carbonatés évoluent sous l'influence du climat au même titre que les composés fersiallitiques, la dureté de la roche est aussi un facteur important face à l'agressivité du milieu.

## I. — INTRODUCTION

La genèse des sols en milieu carbonaté est encore mal connue. D'une part, les pédologues de terrain ressentent une difficulté lorsqu'ils ont à interpréter des profils pédologiques dans les régions calcaires ou dolomitiques ; et d'autre part, la dernière

mise au point de la classification française des sols (C. P. C. S., 1967) est loin d'être satisfaisante pour la classe des sols calci-magnésiques.

Le mode d'altération climatique est un des critères de base d'une classification synthétique des sols. Ce critère fondamental devient cependant insuffisant pour la classe des sols calci-magnésiques, car pour ces sols, la roche-mère a une influence prépondérante.

Les roches-mères calcaires, vis-à-vis des processus d'altération, sont divisées classiquement en calcaires marneux, calcaires purs et friables, calcaires durs et cristallins (DUCHAUFOUR, 1968). Cette classification fait apparaître deux points importants face à l'agressivité du milieu :

— la présence d'une plus ou moins grande quantité de silicates mélangés aux carbonates ;

— la dureté, et donc la cohésion de la roche carbonatée. Mais d'autre part, étant donné leur comportement chimique voisin, les éléments calcium et magnésium sont très souvent associés dans la nature sous forme de carbonates. Du point de vue de leur composition chimique et minéralogique, les roches carbonatées se répartissent donc entre les trois pôles d'un triangle (MOLLAZAL, 1961) (fig. 1).

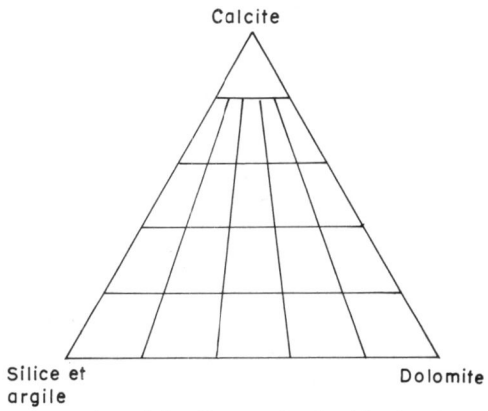



FIG. 1. — *Diagramme triangulaire illustrant la classification des roches carbonatées d'après leur composition*

L'altération d'un matériel calcosialferrique, c'est-à-dire d'un matériel compris entre les pôles calcite et argile, a déjà étéabordée (PEDRO, 1968 et 1970). Le processus évolutif met en œuvre la géochimie des éléments sialferriques, la géochimie des éléments calciques, et les interactions entre ces deux séries d'éléments.

Mais l'étude des pôles calcite et dolomite, c'est-à-dire des roches carbonatées proprement dites, n'a pas encore été effectuée. C'est donc la géochimie de la série calcique et de la série calci-magnésique qui fait l'objet des recherches expérimentales abordées ici. Cette première étude présente les résultats obtenus sur trois roches soumises à une évolution *in vitro* en conditions données :

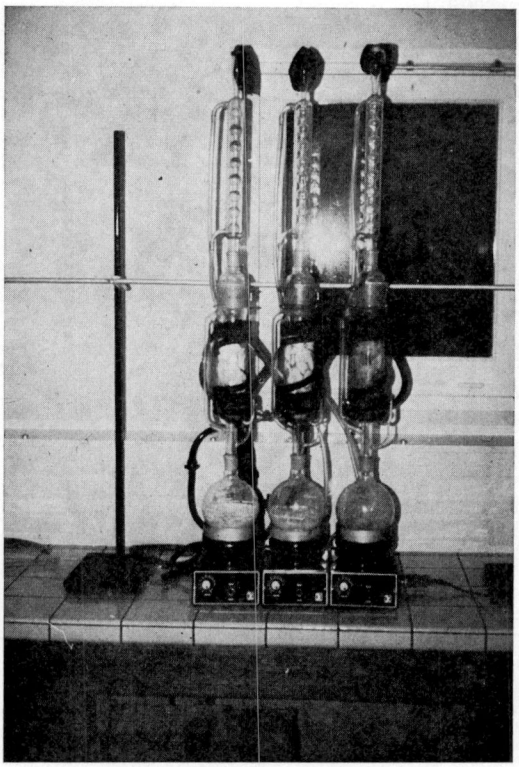
— deux calcaires purs, l'un friable, l'autre compact ;

— et une dolomie.

## II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. — *Description du dispositif expérimental* (cliché 1)

L'altération a été conduite en utilisant le dispositif classique de l'extracteur « Soxhlet » (PEDRO, 1964), mais en présence de $CO_2$. Toutefois, afin de diminuer l'importance de la zone de fluctuation phréatique dans le manchon extracteur, la hauteur du siphon latéral a été réduite à 5 cm.



Cliché 1. — *Dispositif expérimental*

D'autre part, pour homogénéiser la température dans le corps de l'appareil extracteur, et réduire les effets thermiques, provenant en particulier du ballon d'accumulation, un tube réfrigérant a été enroulé serré autour de la base du manchon.

### B. — *Caractéristiques du cycle expérimental*

1. *Thermiques et hydriques.*

La température, déterminée essentiellement par la longueur des réfrigérants et la vitesse de circulation de l'eau dans ces réfrigérants, restait voisine de *30°C* dans l'enceinte de l'extracteur, tandis que l'eau recueillie à la base du manchon, dans la zone de fluctuation phréatique, était de *50°C à 55°C.*

La quantité d'eau percolant dans le manchon était dans ces conditions de *1,3 à 2,6 l/jour*, ce qui, pour la durée des expériences, donnerait un volume global de 300 à 600 l.

L'étalonnage ayant été insuffisant, les résultats seront exprimés par la suite, non pas en fonction de l'intensité de percolation, mais de la durée des cycles. Pour cela, il faut admettre que les conditions thermohydriques furent relativement homogènes, ce qui semble vérifié par les résultats.

2. *Physico-chimiques.*

Au début de chaque cycle, l'eau permutée introduite dans les ballons est bouillie, afin d'éliminer les gaz dissous et plus particulièrement l'oxygène ; puis elle est saturée de $CO_2$. L'air contenu dans l'extracteur est chassé par un courant de $CO_2$, et l'extrémité des réfrigérants est munie d'un ballon en baudruche, destiné à maintenir exclusivement une atmosphère de gaz carbonique et de vapeur d'eau dans le dispositif.

Dans ces conditions, la capacité hygrométrique de l'air varie de 92 à 118 mm de mercure entre 50° et 55°C, et comme la pression totale est égale à la pression atmosphérique, on peut admettre qu'au début de chaque cycle, la pression partielle de $CO_2$ dans le manchon extracteur est comprise entre 640 et 670 mm de mercure (c'est-à-dire entre 0,842 et 0,882 atm.).

L'eau de condensation en équilibre avec cette atmosphère carbonique se sature. La solution aqueuse obtenue contient donc des molécules de $CO_2$ et de $H_2CO_3$. Toutefois, que les molécules soient hydratées ou non, il n'en résulte aucune conséquence pour les calculs (Kern, 1960). La quantité de $CO_2$ dissoute, suivant la réaction :

$$H_2O_{\text{liquide}} + CO_{2\ \text{gaz}} = H_2CO_{3\ \text{aqueux}}$$

peut être déterminée à partir de la constante d'équilibre

$$K_{CO_2} = \frac{H_2CO_3}{P_{CO_2}}$$

Cette constante a été calculée à partir des valeurs des énergies libres standard de réaction données par Garrels et Christ (1967), les corrections de températures étant effectuées suivant l'équation de Van't Hoff :

$$\frac{d\ (\text{Log}\ K)}{d\ (T)} = \frac{H^0r}{RT^2}$$

Les valeurs des enthalpies standard employées sont celles relevées par les mêmes auteurs que précédemment. Nous obtenons ainsi :

$$\text{pour } 50°C : K_{CO_2} = 10^{-1,73}$$
$$\text{et pour } 55°C : K_{CO_2} = 10^{-1,78}$$

La teneur en anhydride carbonique dissous dans l'eau de percolation, exprimée en *mg de $CO_2$ par litre*, sera donc comprise entre *615 et 720*.

Le pH de neutralité de l'eau de condensation serait, dans ces conditions, d'environ *6,6*, tandis que le pH calculé de l'eau carbonique serait voisin de *4,0*. L'attaque des carbonates se produit donc sous l'action d'une solution relativement acide. Mais, avec ce système d'alimentation en $CO_2$, il n'y a aucun renouvellement des pertes éventuelles pendant la durée du cycle, et nous ne savons pas si, à la fin de l'expérimentation, l'atmosphère est toujours constituée uniquement de gaz carbonique et de vapeur d'eau. Nous voyons donc là encore apparaître une certaine imprécision dans les données du cycle.

C. — *Nature des roches soumises à l'altération*

1. *Choix des roches et étude chimique.*

Dans cette phase préliminaire, l'étude a été limitée à l'altération :

— d'un calcaire pur, tendre, poreux, friable : la craie blanche du Sénonien inférieur (Matougues, Marne) ;

— d'un calcaire dur cristallin provenant du Bathonien inférieur (environs de Chaumont, Haute-Marne) ;

— d'une dolomie du Muschelkalk (carrières de Voisey, Haute-Marne).

Le tableau 1 reproduit les compositions chimiques de ces trois roches. De plus, ont été indiquées la densité et la porosité qui traduit la capacité de rétention en eau de ces matériaux.

2. *Étude minéralogique des roches.*

Des échantillons de roche ont été broyés finement ; la nature des poudres obtenues a été déterminée par diffraction des rayons X et par analyse thermique différentielle.

La craie et le calcaire dur sont constitués uniquement de calcite, tandis que la dolomie contient beaucoup de dolomite et peu de calcite (fig. 2).

Les pourcentages en masse (tabl. 1), associés aux résultats précédents, montrent que la calcite représente :

TABLEAU I

*Composition chimique et porosité des roches-mères*

| | Craie | Calcaire | Dolomie |
|---|---|---|---|
| CaO (%) ..... | 55,3 | 55,6 | 31,6 |
| MgO (%) ..... | tr. | 0,2 | 20,4 |
| Insoluble HCl (%) | 1,1 | 1,0 | 1,7 |
| $Fe_2O_3$ (%) ..... | 0,02 | 0,01 | 0,34 |
| $CO_2$ (%) (1) ..... | 43,6 | 43,2 | 46,0 |
| $CO_2$ (%) (2) ..... | 43,4 | 43,6 | 47,1 |
| Densité apparente | 1,60 | 2,42 | 2,76 |
| Porosité (%) ..... | 34,5 | 9,5 | 5,7 |

(1)$CO_2$ obtenu par différence à 100.
(2)$CO_2$ calculé par rapport à CaO + MgO.

— pour la craie : 98,7 p. 100 de la roche ;
— pour le calcaire : 99,2 p. 100 de la roche ;
— pour la dolomie : 5,5 p. 100 de la roche ;

et que la dolomite constitue 93,7 p. 100 de la dolomie.

Cependant, d'autres spectres de diffraction des rayons X pour la dolomie n'ont pas fait ressortir les raies caractéristiques de la calcite. Ce minéral aurait donc une répartition très hétérogène. Pour vérifier ce point, il a fallu faire appel à une étude microscopique sur plaques minces.

D'autre part, une analyse minéralogique des trois roches a été effectuée après dissolution des carbonates dans un acide faible (tabl. 2).

TABLEAU 2

*Nature minéralogique des fractions silicatées des roches-mères*

| | Kaolinite | Illite | Minéral à 14 Å | Quartz |
|---|---|---|---|---|
| Craie ..... | ++ | + | ε | +++ |
| Calcaire ..... | +++ | ++ | | |
| Dolomie..... | | + | | +++++ |

3. *Étude pétrographique des échantillons.*

S'il est important de connaître la répartition de la calcite par rapport à la dolomite pour la dolomie, on peut penser que ce n'est pas là le seul renseignement que soit susceptible d'apporter l'étude pétrographique. En effet, la taille des cristaux, la présence ou l'absence d'un ciment recris-

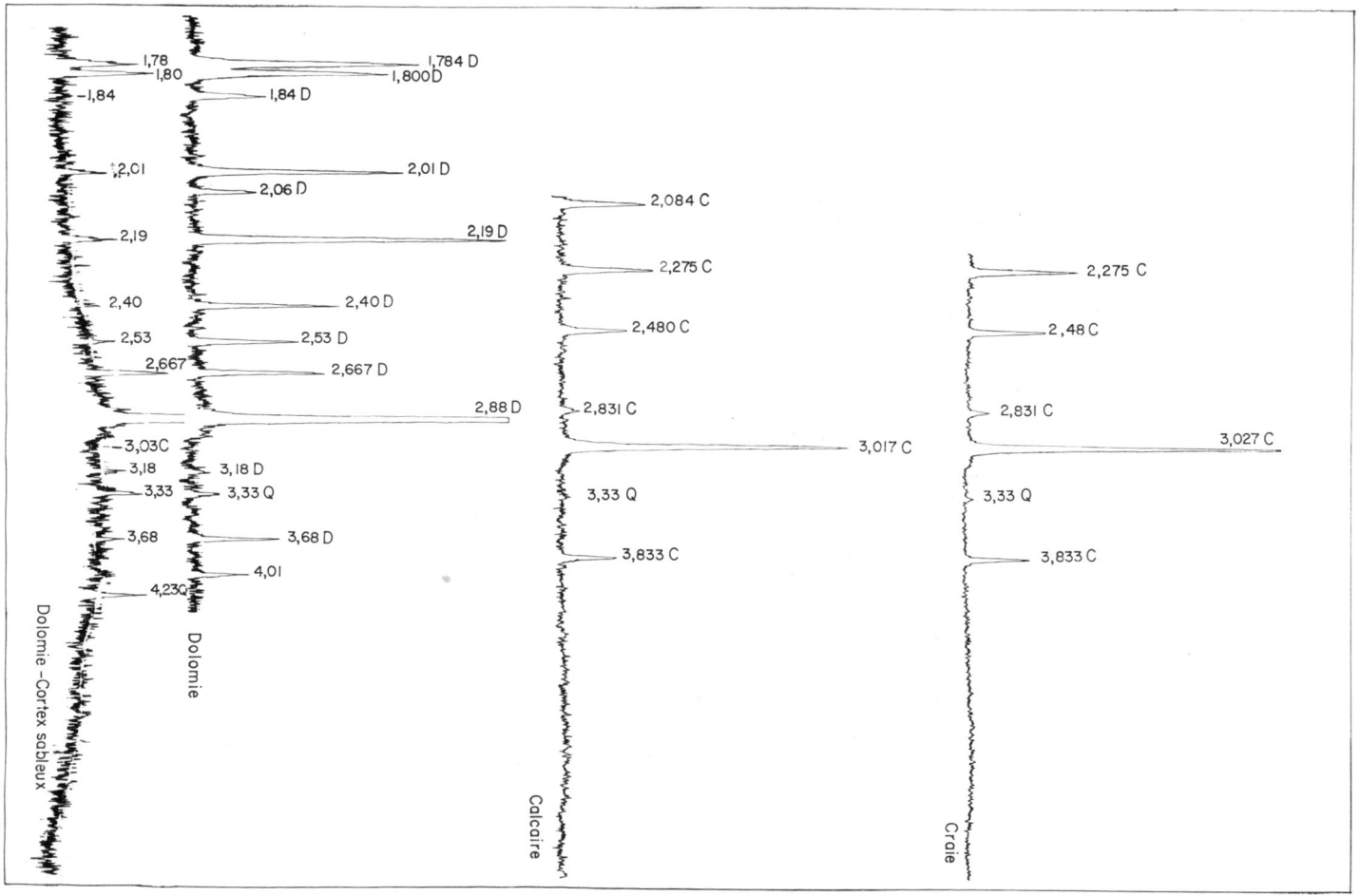
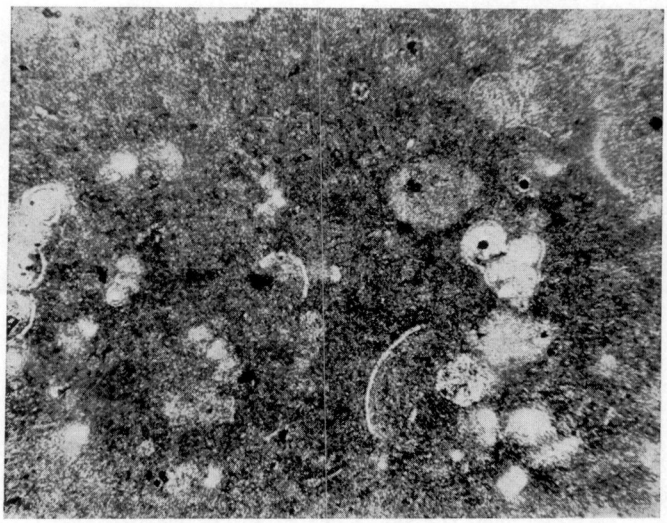



FIG. 2. — *Diagramme X des roches-mères et d'un cortex de la dolomie après altération* (C : calcite ; D : dolomite ; Q : Quartz)

tallisé, la nature de la porosité semblent être des éléments importants des conditions d'altération de ces roches carbonatées. Aussi les trois roches ont été observées en plaques minces.

a) *Craie* (cliché 2).

Elle est formée d'une gangue de calcite à grains microcristallins de l'ordre du micron. Ces grains sont difficilement discernables en raison de leur très faible dimension, et de leur superposition dans l'épaisseur de la plaque. Cette gangue serait surtout constituée de Coccolithes, visibles seulement au microscope électronique (JUNG, 1969).



Cliché 2. — *Craie, roche saine* (LN, × 125)
On observe les Lagenidés, dont il ne reste qu'un fragment de la loge unique et les Globigérinidés, comportant plusieurs loges sphériques

Disséminés dans cette gangue, on observe des tests de Lagenidés et Globigérinidés, qui occupent 5 à 10 p. 100 de la surface de la plaque. Ces Foraminifères ont des dimensions moyennes de 0,3 à 0,4 mm. « La plupart du temps, on ne voit plus les loges, mais de petites taches blanches de calcite qui en marquent la place » (MORET, 1958). Ces taches résultent de la présence de microcristaux d'une taille légèrement supérieure aux microcristaux de la gangue (1 à 3 μ).

Des oxydes de fer sont présents en faible quantité (1 à 3 p. 100 de la surface de la roche). Ces oxydes présentent un noyau de couleur rouge noirâtre, à bordure assez nette, entouré d'une auréole jaune-orange diffuse. La plupart de ces oxydes ont des dimensions de 0,7 à 1,0 mm. Mais quelques-uns atteignent 3 à 6 mm.

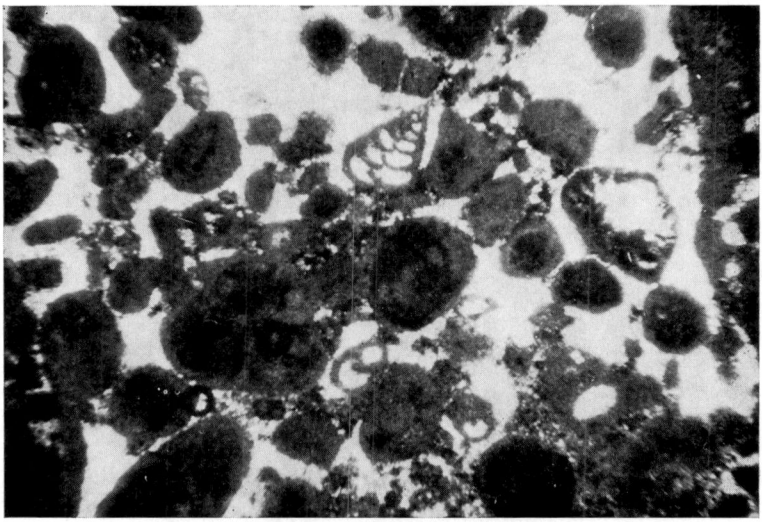
Dans ces plaques, on observe plusieurs chenaux atteignant 1 cm de longueur, mais l'étude de cette porosité est assez délicate.

b) *Calcaire* (cliché 3).

Il est constitué d'oolites de forme irrégulière, brunes en lumière naturelle. Ces oolites dont la dimension moyenne est de 0,10 à 0,15 mm peuvent atteindre 0,60 mm et même 0,90 mm. Le cortex de ces oolites est formé de calcite microgranulaire (dimension des cristaux $\simeq$ 1 μ). Il entoure un nucléus constitué par des débris d'organismes arrondis par usure, ou par des coquilles de Miliolidés. Le test brun-noir de ces Foraminifères délimite l'intérieur des loges constitué de calcite translucide microgranulaire (dimension des cristaux : 5 à 20 μ).

Quelques-unes parmi ces petites « balles » ne montrent pas de différenciation en cortex et nucléus : elles sont uniquement constituées de calcite microgranulaire brune, identique à celle des cortex précédents. Ces structures appartiennent à des débris roulés et usés de calcaire à grains fins.

Ces oolites et pseudo-oolites sont cimentées par une calcite macrogranulaire translucide, dont les cristaux ont des dimensions variant de 25 μ à 200 μ. Ce ciment calcitique ne présente pas

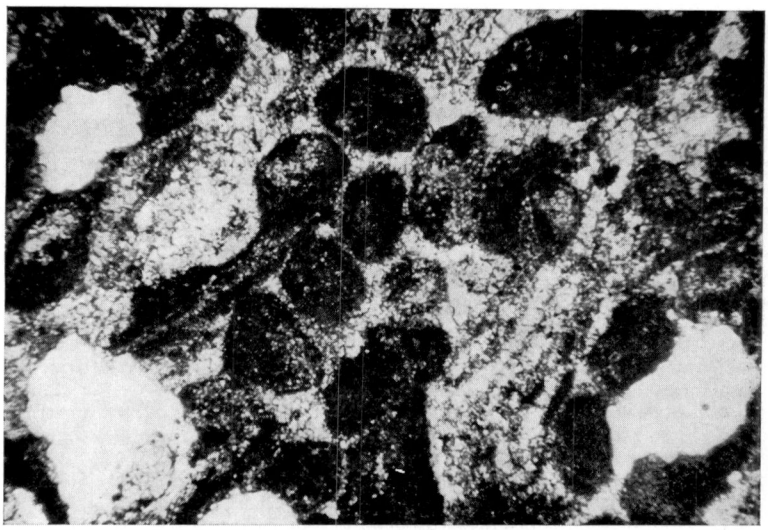


Cliché 3. — *Calcaire dur. Roche saine* (LN, × 44)
Oolites et pseudo-oolites, liées par un ciment calcitique (blanc)

d'impuretés. On peut donc penser que les argiles, identifiées par diffraction des rayons X, sont associées aux cortex des oolites (JUNG, 1969). Dans des zones lacunaires, soit par absence de dépôt d'oolites, soit par disparition ultérieure de ces oolites, se trouve de la calcite atteignant 2 à 3 mm.

La porosité est très faible : environ 1 p. 100 de la surface de la plaque. Cette porosité correspond à l'absence de un ou plusieurs cristaux de calcite dans le ciment.

c) *Dolomie* (cliché 4).



Cliché 4. — *Dolomie. Roche saine* (LN, × 44)
Oolites et gravelles, cimentées par des cristaux dolomitiques
La « porosité » apparaît en blanc

Un procédé de coloration différentielle a été appliqué au cours de la préparation de la plaque afin de discerner aisément les cristaux de dolomite et de calcite : une solution de $AgNO_3$ a été déposée sur la plaque chauffée, maintenue quelques minutes et lavée ; l'échantillon a ensuite été traité pendant quelques secondes par une solution de $K_2CrO_4$. Après ce traitement, la teinte des grands cristaux de dolomite reste inchangée, tandis que ceux inférieurs à 0,01 mm deviennent bruns ; notons que la calcite prend alors une couleur rouge-orange.

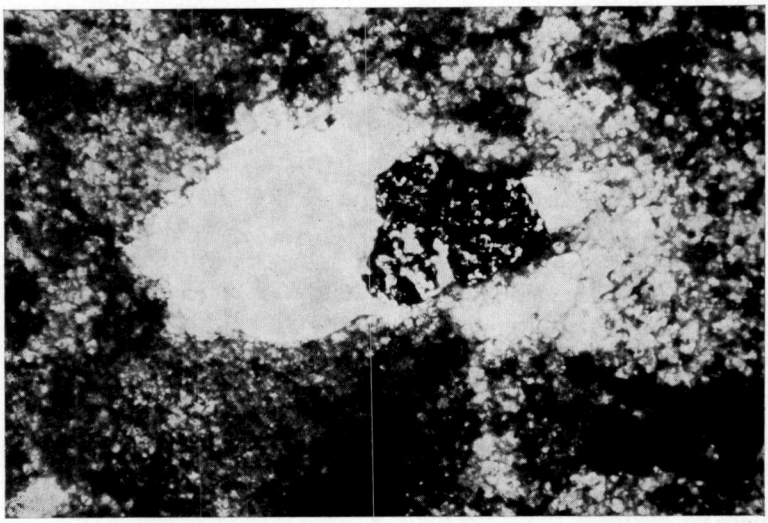
La dolomie apparaît constituée d'oolites et de gravelles (dimension moyenne de 0,3 à 0,5 mm), liées par un ciment microgranulaire.

Les oolites sont formées d'un cortex brun foncé de microcristaux de dolomite (dimension des cristaux $\simeq$ 1 $\mu$), entourant un nucléus dolomitique brun clair ou incolore, avec des cristaux de 15 à 20 $\mu$.

Des microcristaux incolores de dolomite (taille moyenne $\simeq$ 40 $\mu$) comblent les interstices entre les oolites et les gravelles. Ce ciment, comme celui du calcaire, ne montre pas d'impuretés. La majorité des minéraux argileux est donc encore associée aux cortex des oolites.

De nombreuses lacunes apparaissent, et créent une importante porosité dans ce ciment : 10 à 15 p. 100 de la superficie de la plaque. La comparaison de ces résultats, et de ceux figurant dans le tableau 1, amène à penser que la majorité des vides ne possède pas de communications entre eux. Mais il est possible qu'au cours de la mesure de porosité, un emprisonnement d'air ait eu lieu. De ce fait, la porosité ouverte mesurée ne représenterait que 50 p. 100 de la porosité ouverte totale, pour le diamètre des canalicules de cette dolomie (1).

L'observation de la plaque mince montre que certains chenaux sont très développés : l'un d'eux, par exemple, traverse la plaque sur une longueur de 2 cm ; sa largeur varie de 0,15 mm à 0,8 mm. Cependant, ce chenal est obstrué par des dépôts récents : sur la bordure on trouve un revêtement discontinu de microcristaux incolores de dolomite (20 à 85 $\mu$). Le reste de la porosité est comblé par des cristaux rouges de calcite (25 à 40 $\mu$), associés à des minéraux opaques. Ces minéraux opaques représentent, soit des oxydes de fer, soit des inclusions ferrugineuses liées à des argiles. En bordure de quelques autres chenaux, observables en coupe transversale dans la plaque, on remarque des microcristaux identiques de calcite (cliché 5).



Cliché 5. — *Dolomie. Roche saine* (LN, × 125)
Coupe transversale d'un canalicule, avec dépôt de calcite liée à des oxydes de fer

La calcite, décelée par étude minéralogique et chimique, est donc à relier à l'existence de vides et n'est pas, de ce fait, un constituant des particules originelles; en conséquence, sa présence serait due à un phénomène d'apport très récent.

(1) R. Gras (1971). Communication orale.

4. *Mise en place des matériaux dans les appareils extracteurs.*

Des fragments de roches concassées, de 2 à 3 cm de diamètre, ont été introduits dans les manchons des Soxhlets. Les poids totaux de dolomie et de calcaire étaient de 700 g.

Pour la craie, en raison de sa masse volumique beaucoup plus faible, nous n'avons pu mettre dans le manchon que 500 g. Les poids et volumes moyens des morceaux de roches sont indiqués dans le tableau 3.

TABLEAU 3

*Poids et volumes moyens des matériaux soumis à l'altération*

| | Craie | Calcaire | Dolomie |
|---|---|---|---|
| Nbre de framents . | 38 | 57 | 32 |
| Pds moy. d'un fragment (g) ... | 13,1 | 12,3 | 21,9 |
| Vol. moy. d'un fragment ($cm^3$) . | 8,2 | 5,1 | 7,9 |

## III. — RÉSULTATS DE L'ALTÉRATION

### A. — *Étude des cortex d'altération*

1. *Étude morphoscopique.*

a) *Les reliquats de craie* présentent, soit des surfaces très aplanies, soit des ravines plus ou moins accentuées. Les ravines, bifurquées, peuvent atteindre 2 à 3 mm de profondeur et de largeur.

Sur la surface des morceaux de craie, il apparaît des taches de couleur rouille peu accentuées (10 YR 8/4 à 8/6), mais ressortant bien au milieu du blanc. En quelques rares points, l'intensité peut être plus élevée (7,5 YR 6/8). Cette couleur n'est pas due à l'existence d'une plage uniforme, mais à une juxtaposition de points plus ou moins serrés. Toutes ces surfaces sont de faible étendue.

Dans la zone de battement phréatique, on remarque quelques dépôts de calcaire cristallin, de l'ordre du millimètre carré, de couleur gris-beige (10 YR 8/3) à marron (10 YR 5/3).

Le fond du manchon laisse apparaître, enfin, un dépôt blanchâtre.

b) *Les reliquats de calcaire dur* montrent également des traces de ruissellement, mais très peu accentuées. Sur quelques morceaux seulement se remarquent des striations rappelant des rigoles d'érosion.

A la surface de ce calcaire dur blanchâtre, apparaissent des plages plus ou moins continues d'une couleur rouille peu accentuée (10 YR 8/6 à 8/8). Mais, il existe également quelques taches, de 1 à 3 mm, d'une couleur rouille plus soutenue (5 YR 4/4 à 5 YR 5/6).

Dans la zone phréatique, s'observent de très importants dépôts de calcaire cris-

tallin peu épais, gris-beige (10 YR 7/4) translucide, à brun-marron (5 YR 8/3). Ces dépôts portent fréquemment des aiguilles cristallines atteignant 1 mm de long.

Le fond du manchon, sous la zone de siphonnage, contient un dépôt plus ou moins mamelonné de calcaire cristallisé gris-beige (10 YR 7/4).

c) *Les reliquats de dolomie* montrent que l'attaque, qui résulte essentiellement d'une dissolution, a abouti à un microrelief ruiniforme.

Sur les surfaces où la décarbonatation a été peu intense, s'est développé un cortex à forte *détachabilité*, de texture sableuse et se désagrégeant facilement sous le doigt.

Dans la zone supérieure au siphon, existent des plages très étendues de l'ordre du cm², d'un rouille peu accentué (10 YR 7/6). La couleur la plus vive obtenue en de rares points est 10 YR 5/8 à 10 YR 6/8.

La zone phréatique est marquée par des dépôts en plages de plusieurs cm² de carbonates cristallins, translucides quand ils sont peu épais, blancs quand il existe un microconcrétionnement.

Dans cette zone, apparaissent également de larges plages d'une couleur rouille, peu accentuée (10 YR 7/6), et des zones brun-marron (10 YR 4/4).

2. *Étude minéralogique des cortex d'altération.*

Les croûtes d'altération, ainsi que les dépôts, ont été isolés par grattage, et analysés. Mais étant donné la difficulté de séparation, la plupart des échantillons contiennent des éléments provenant des strates sub-corticales. Les résultats, reportés dans le tableau 4, devront donc être considérés en valeur relative.

De ce tableau il ressort :

TABLEAU 4

*Composition minéralogique des cortex d'altération et des dépôts des manchons, à la fin des essais*

| | | Calcite | Aragonite | Dolomite | Quartz | Argile micacée | Kaolinite |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Craie* | Cortex rouille clair . | +++++ | | | | | |
| | Dépôt du fond du manchon ..... | +++++ | | | + | | + |
| *Calcaire* | Cortex rouille clair . | +++++ | | | + | | |
| | Cortex rouille foncé. | ++++ | | | | | |
| | Dépôts cristallins de la zone phréatique ..... | +++++ | + | | | | |
| | Dépôt du fond du manchon ..... | +++++ | + | | + | | |
| *Dolomie* | Cortex sableux .... | ε | | +++++ | + | | |
| | Cortex rouille clair . | ε | | +++++ | ++ | + | |
| | Plages rouilles de la zone phréatique . | ++ | | +++++ | + | | |
| | Dépôt du fond du manchon ..... | + | | ++++ | ++ | ++ | |

— *pour la craie*, une absence de concentration ou d'appauvrissement relatif du cortex en constituants d'origine, et la présence de kaolinite dans la zone phréatique permanente du fond du manchon ;

— *pour le calcaire dur*, un appauvrissement relatif en calcite pour les cortex rouille les plus vifs, et une néoformation d'aragonite, l'aragonite se formant ou se déposant dans la zone de fluctuation phréatique ;

— *pour la dolomie*, une absence presque totale de calcite au niveau des cortex de la zone « atmosphérique » (fig. 2), une présence en quantité assez élevée de ce même minéral dans la zone phréatique temporaire et l'apparition d'une petite quantité d'argile micacée.

Enfin, on note la présence de quartz ; pour la craie et la dolomie, on constate que ce quartz existe, ou est plus abondant, dans les zones où l'on rencontre aussi des minéraux argileux.

3. *Étude chimique des cortex d'altération.*

Quand les échantillons de croûtes et de dépôts isolés précédemment ont été assez abondants, des analyses chimiques ont été effectuées (tabl. 5).

TABLEAU 5

*Composition chimique des cortex d'altération et des dépôts des manchons, à la fin des essais*

| | | CaO (%) | MgO (%) | Ins. HCl (%) | $Fe_2O_3$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Craie | Cortex rouille clair .. | 51,8 | | 3,2 | 0,18 |
| | Dépôt du fond du manchon ..... | 53,7 | | 3,2 | 0,25 |
| Calcaire | Dépôts cristallins de la zone phréatique | 54,1 | | 1,4 | 0,26 |
| | Dépôt du fond du manchon ..... | 55,7 | | 1,4 | 0,06 |
| Dolomie | Cortex sableux..... | 37,7 | 13,5 | 5,2 | 0,97 |
| | Cortex rouille clair .. | 37,2 | 14,0 | 5,4 | 1,03 |
| | Dépôt du fond du manchon ..... | 36,8 | 12,9 | 6,0 | 1,28 |

*Au niveau des cortex*, et par comparaison aux données du tableau 1, on observe une concentration en fer, de l'ordre de 10 pour la craie, et de 3 pour la dolomie, et une concentration en insoluble HCl d'environ 3 pour les mêmes matériaux.

Pour la craie, ce cortex est marqué par un appauvrissement relatif en calcium tandis que pour la dolomie, il existe au contraire un enrichissement relatif en calcium et en même temps, une élimination non négligeable de magnésium.

Ces résultats de l'analyse chimique pour la dolomie sont en contradiction avec ceux de l'analyse minéralogique. En effet, le « cortex sableux » serait constitué de 61,7 p. 100 de dolomite et de 33,7 p. 100 de carbonate de calcium, tandis que le « cortex rouille clair » montre des teneurs de 64,0 p. 100 de dolomite et 31,6 p. 100 de

carbonate de calcium. On peut donc penser qu'il apparaît, au niveau des cortex de la zone atmosphérique, des carbonates de calcium amorphes ou cryptocristallins, indétectables par diffraction des rayons X.

*Les dépôts des fonds de manchons* montrent des concentrations, par rapport à la roche-mère, variant dans le même sens que les cortex :

— enrichissement en fer et en insoluble pour tous les échantillons,

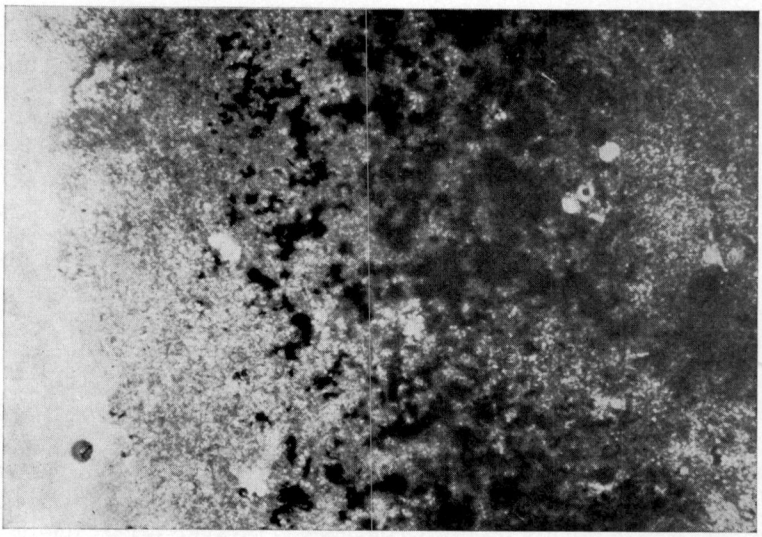
— donc, appauvrissement relatif en éléments carbonatés,

— pour la dolomie, augmentation de la teneur en calcium, et diminution de la teneur en magnésium.

4. *Étude pétrographique des reliquats.*

Les plaques minces effectuées dans des fragments de roches soumis à l'altération ne mettent pas en évidence de différences marquées avec la roche initiale pour la dolomie et le calcaire dur.

De même, pour la craie, la distribution des minéraux carbonatés n'est pas modifiée. Cependant, un fait intéressant apparaît pour les minéraux ferrugineux. Le nucléus de ces oxydes de fer reste inchangé. Mais les auréoles diffuses jaune-orange n'existent plus. Par contre, en bordure de la roche apparaît un cortex de 1,10 à 1,20 mm d'épaisseur (cliché 6). Ce cortex est d'une couleur brune plus foncée que



Cliché 6. — *Craie. Roche altérée* (LN, × 125)
Accumulation sub-corticale d'oxydes de fer

l'ensemble de la plaque ; dans sa partie interne (à environ 0,20 mm de la surface), il contient de très nombreux granules brun-noir d'oxyde de fer, à limites très nettes, de dimensions variant de 0,05 à 0,25 mm. De ce cortex, partent vers l'intérieur de la roche, des denticulations, de structure analogue à celle du cortex ; ces denticulations semblent suivre un réseau préexistant de fissures.

## B. — *Étude des lessivats*

Les produits éliminés des manchons s'accumulent dans le ballon en formant un dépôt blanchâtre pour la craie, jaune-rosâtre pour le calcaire, et jaunâtre pour la dolomie.

1. *Caractéristiques minéralogiques des lessivats.*

Les poudres recueillies après évaporation des eaux contenues dans les ballons d'accumulation à la fin des premier, quatrième, et septième cycles, ont été analysés comme précédemment (tabl. 6).

TABLEAU 6

*Composition minéralogique des lessivats*

| | Cycle | Calcite | Dolomite | Aragonite | Argile Type Talc Saponite |
|---|---|---|---|---|---|
| Craie | 1er | × | | | |
| | 4e | × | | | |
| | 7e | × | | | |
| Calcaire | 1er | ++++ | | | |
| | 4e | +++ | | + | |
| | 7e | ++ | | + | |
| Dolomie | 1er | +++ | + | | + |
| | 4e | ++ | ++ | + | + |
| | 7e | ++ | + | (?) | ε |

Les lessivats de craie sont constitués, comme la roche-mère, uniquement par de la calcite.

Pour le calcaire et la dolomie, il apparaît en plus des composés nouveaux, formés à partir des solutions d'illuviation. Ainsi, on constate la présence :

— d'aragonite dans les lessivats du calcaire et de la dolomie,

— de minéraux argileux silico-magnésiens et de dolomite dans les lessivats de dolomie.

Or, cette dolomite doit bien être considérée comme un minéral de néoformation. En effet, en l'absence de filtre, on pourrait penser que cette dolomite est entraînée en suspension. Mais plusieurs résultats convergents laissent penser que le calcium et le magnésium ont été lessivés et entraînés en solution : D'abord dans cet essai, il n'a jamais été observé d'entraînement de particules solides en suspension lors des siphonages ; d'autre part, la présence d'aragonite et d'argile montrent bien que des néoformations ont eu lieu dans le ballon d'accumulation ; enfin, le bilan chimique des exportations (cf. § B-2) montre une régularité du lessivage, peu compatible avec un entraînement mécanique.

Ainsi se posent les problèmes de néoformation simultanée de minéraux carbonatés.

2. *Étude chimique des lessivats* (tabl. 7).

Les deux valeurs indiquées de la teneur en $CO_2$ permettent d'évaluer la précision des résultats analytiques.

A partir de ces données, ont été établies les courbes (fig. 3 à 8) mettant en évidence les divers phénomènes de lessivage.

a) *Taux d'accumulation et nature du processus de décarbonatation.*

La représentation des poids recueillis en fonction de la durée de décarbonatation (fig. 3) montre une très forte exportation, à partir de la craie. Cette forte exportation, très irrégulière, est essentiellement fonction d'un entraînement en suspension. Cet entraînement donne lieu à un véritable phénomène d'érosion par ruissellement, avec la création des micro-ravines observées précédemment ; une grande partie du produit entraîné n'est donc pas passé par le stade de la dissolution.

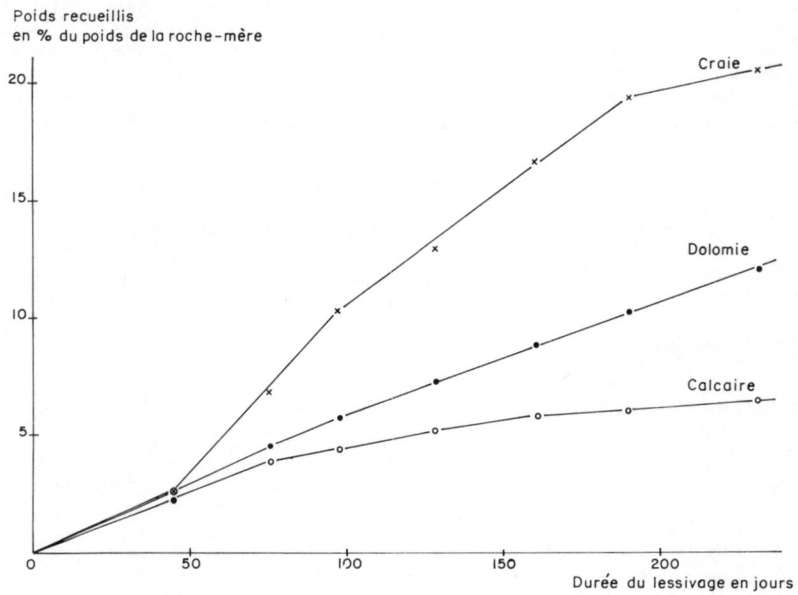



FIG. 3. — *Exportations totales*

Pour le calcaire dur et la dolomie, l'exportation est due à un phénomène chimique de dissolution, d'aspect très régulier, en particulier, à partir du 75e jour. Elle aboutit pour la dolomie au micro-relief ruiniforme.

On remarque d'autre part que la quantité de lessivat obtenue à partir de la dolomie est supérieure à celle provenant du calcaire dur.

L'évolution de l'exportation moyenne journalière (fig. 4) fait ressortir *les irrégularités de l'attaque de la craie*, fonction d'une division mécanique et de l'entraînement en suspension des particules ; alors que pour le calcaire dur et la dolomie, il apparaît un régime stable à partir du 100e jour environ.

Ceci tendrait aussi à démontrer que la décarbonatation plus intense de la dolomie

TABLEAU 7

*Composition physico-chimique des lessivats*

| | | Cycles | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Durée en jours .. | 45 | 30 | 22 | 31 | 32 | 30 | 41 |
| Craie | Lessivat d'altération | pH de la solution * ..... | 8,45 | 8,55 | 8,85 | 9,60 | 9,10 | 8,75 | 8,80 |
| | Lessivat d'accumulation | Poids recueillis en g ..... | 12,850 | 26,550 | 12,085 | 12,850 | 18,070 | 13,950 | 5,900 |
| | | CaO (%) ..... | 53,2 | 53,6 | 51,2 | 51,5 | 50,7 | 52,3 | 50,7 |
| | | MgO (%) ..... | — | — | — | — | tr. | — | — |
| | | Insoluble HCl (%) ..... | 5,1 | 2,7 | 7,7 | 7,7 | 7,9 | 6,7 | 9,2 |
| | | $Fe_2O_3$ (%) ..... | | | | | | 0,02 | 0,02 |
| | | $CO_2$ (%) (1) .... | 41,7 | 43,7 | 41,1 | 40,9 | 41,4 | 41,0 | 40,1 |
| | | $CO_2$ (%) (2) .... | 41,8 | 42,1 | 40,2 | 40,4 | 39,8 | 41,0 | 39,8 |
| Calcaire | Lessivat d'altération | pH de la solution * ..... | 8,80 | 8,50 | 8,35 | 9,30 | 8,70 | 8,50 | 8,45 |
| | Lessivat d'accumulation | Poids recueillis en g ..... | 17,925 | 9,700 | 3,435 | 5,100 | 4,290 | 1,730 | 3,200 |
| | | CaO (%) ..... | 52,2 | 52,6 | 50,4 | 48,7 | 46,8 | 46,5 | 42,0 |
| | | MgO (%) ..... | 0,2 | 0,1 | 0,1 | tr. | tr. | tr. | tr. |
| | | Insoluble HCl (%) ..... | 6,0 | 5,5 | 9,4 | 12,6 | 14,6 | 16,9 | 24,2 |
| | | $Fe_2O_3$ (%) ..... | | | | | | 0,02 | 0,01 |
| | | $CO_2$ (%) (1)..... | 41,7 | 41,8 | 40,1 | 38,6 | 38,5 | 36,6 | 33,8 |
| | | $CO_2$ (%) (1) .... | 41,2 | 41,4 | 39,7 | 38,3 | 36,8 | 36,5 | 33,0 |
| Dolomie | Lessivat d'altération | pH de la solution * ..... | 8,80 | 8,75 | 8,40 | 8,80 | 8,65 | 8,70 | 8,70 |
| | Lessivat d'accumulation | Poids recueillis en g ..... | 16,290 | 15,850 | 7,910 | 9,950 | 11,430 | 9,730 | 12,800 |
| | | CaO (%) ..... | 25,2 | 24,1 | 25,2 | 22,9 | 26,0 | 24,1 | 24,1 |
| | | MgO (%) ..... | 17,8 | 19,7 | 19,1 | 18,7 | 16,9 | 18,7 | 17,8 |
| | | Insoluble HCl (%) ..... | 18,6 | 12,2 | 15,4 | 24,0 | 14,6 | 15,2 | 17,6 |
| | | $Fe_2O_3$ (%) ..... | 0,10 | 0,19 | 0,32 | 0,28 | 0,25 | 0,28 | 0,58 |
| | | $CO_2$ (%) (1) .... | 38,3 | 43,8 | 40,0 | 34,1 | 42,3 | 41,7 | 39,9 |
| | | $CO_2$ (%) (2) .... | 39,2 | 40,4 | 40,6 | 38,4 | 38,8 | 39,3 | 38,3 |

* Mesuré après refroidissement et équilibre avec la pression de $CO_2$ de l'atmosphère.

(1) $CO_2$ obtenu par différence à 100.

(2) $CO_2$ calculé par rapport à CaO + MgO.

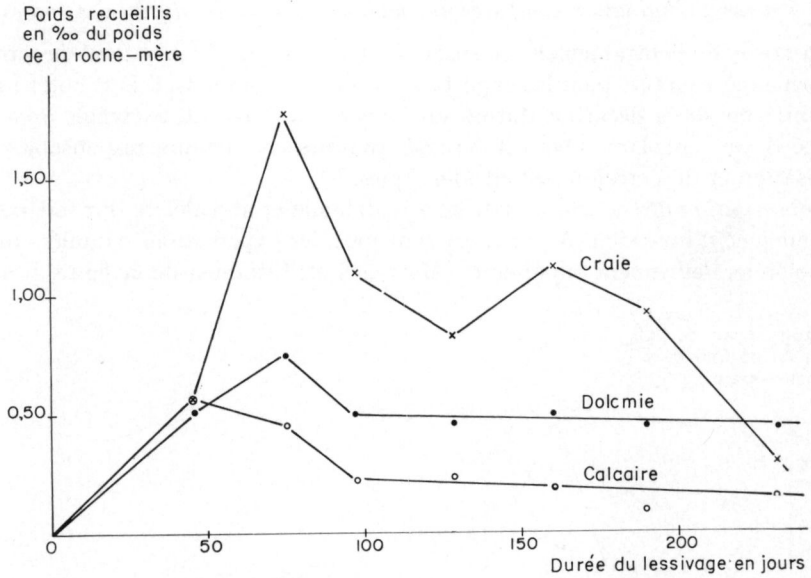



FIG. 4. — *Évolution des exportations moyennes journalières*

par rapport au calcaire, proviendrait d'une solubilité totale 2 à 3 fois supérieure dans les conditions de l'expérience.

D'autre part, cette stabilité des exportations moyennes journalières vérifie l'hypothèse de la régularité des caractéristiques thermohydriques dans les cycles successifs.

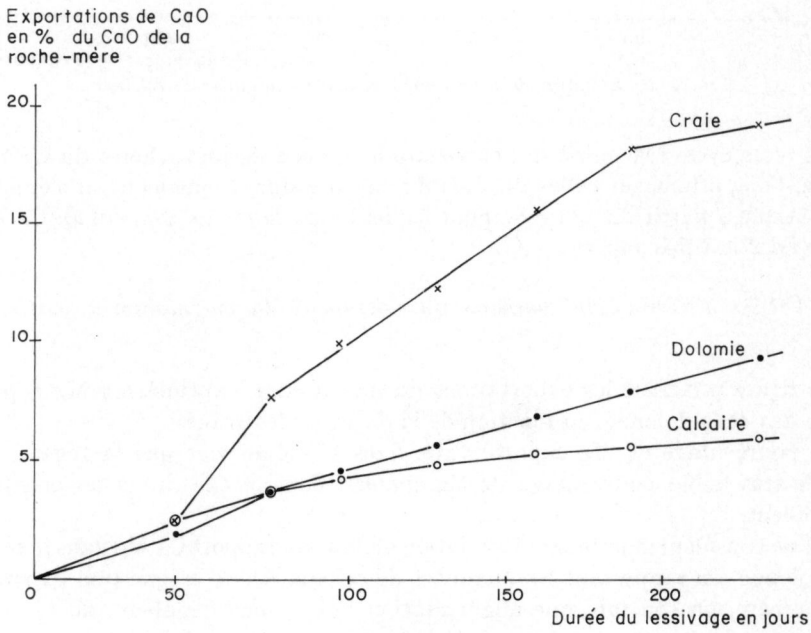



FIG. 5. — *Exportations du calcium*

b) *Vitesse d'élimination comparée du calcium à partir des différentes roches.*

En raison de l'entraînement en suspension de la craie, il est normal de retrouver cette roche-mère en tête pour les exportations (fig. 5). Toutefois, il faut noter l'aspect assez uniforme de la décarbonatation vis-à-vis de la durée du lessivage, donc de la quantité d'eau percolant. Ceci est normal, puisque les facteurs responsables de la solubilisation et de l'érosion restent identiques.

L'observation des courbes relatives à la dolomie et au calcaire dur fait ressortir un phénomène d'inversion. A partir du 100e jour, les exportations cumulées du CaO de la dolomie, deviennent supérieures. Mais en fait, l'examen de la figure 6 montre

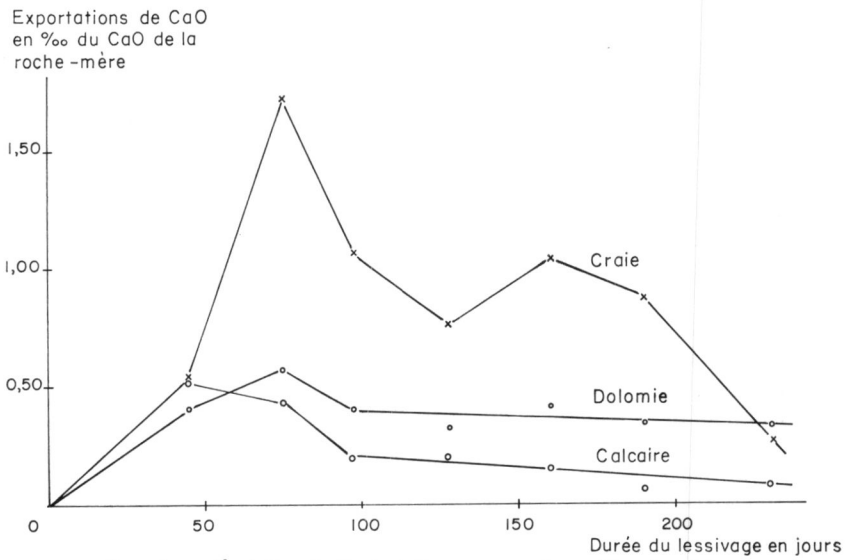



FIG. 6. — *Évolution de l'exportation moyenne journalière de calcium*

que dès le 2e cycle (75 jours), les exportations moyennes journalières du CaO de la dolomie, l'emportent sur celles du CaO du calcaire dur. Finalement, il s'établit un régime stable à partir du 3e cycle, pour lequel l'*exportation en solution du CaO de la dolomie est 2 à 3 fois supérieure.*

c) *Vitesse d'élimination comparée du calcium et du magnésium à partir de la dolomie.*

La figure 7 retrace les exportations du magnésium, exprimée en MgO, pour le calcaire dur et la dolomie, en fonction de la durée du lessivage.

Le pourcentage de Mg exporté varie dans le même sens que la teneur, étant donné le très faible pourcentage de Mg contenu dans le calcaire et les erreurs qui en découlent.

Si l'on considère maintenant l'évolution globale du rapport Ca/Mg dans le reliquat de la dolomie, en rapportant les quantités de calcium et de magnésium exportées à la roche-mère, on constate une augmentation faible, mais régulière, de ce rapport (fig. 8). *Le magnésium est donc éliminé plus rapidement que le calcium.*

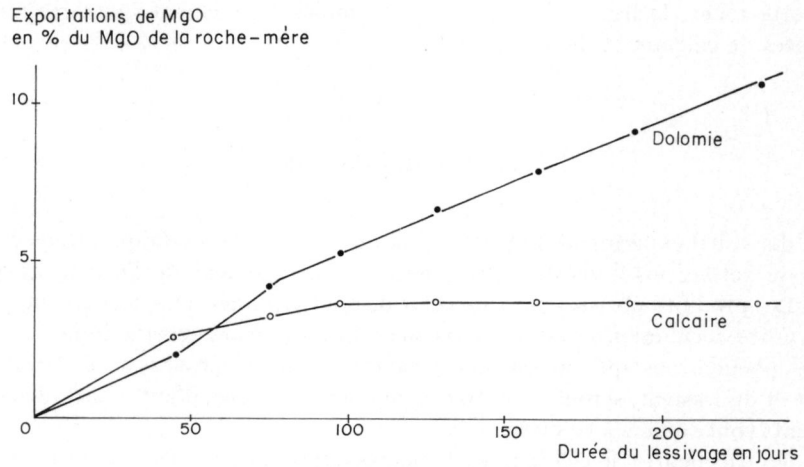



FIG. 7. — *Exportations de Magnésium*

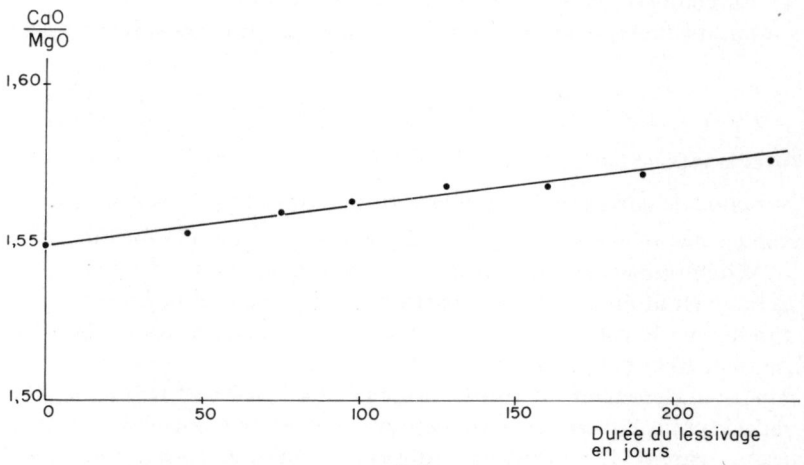



FIG. 8. — *Évolution du rapport* $\frac{CaO}{MgO}$ *dans le reliquat de la dolomie*

d) *Comportement des fractions fersiallitiques.*

Les produits insolubles à l'acide chlorhydrique sont représentés en grande partie par *des composés siliciques*. Or, on constate que rapidement des teneurs très importantes, supérieures à celles de la roche-mère pour la craie et la dolomie sont atteintes à partir d'environ 200 jours. Ces quantités élevées dans les lessivats peuvent être imputées à une attaque du pyrex des manchons et des ballons d'accumulation des Soxhlets.

Il n'est donc pas possible d'étudier, avec ce matériel, la dynamique de la silice entrant dans la constitution des roches carbonatées.

Le comportement *du fer* est difficile à établir. Peu de données ont été obtenues pour la craie et le calcaire dur. Par contre, pour la dolomie, les teneurs en fer des lessivats, sont presque constamment inférieures à celles de la roche-mère (tabl. 7).

Pour cette roche, le fer serait donc entraîné moins rapidement que l'ensemble des carbonates de calcium et de magnésium.

## IV. — DISCUSSION

Le dispositif expérimental utilisé reproduit un cycle géochimique. Dans ce cycle, la période active, vis-à-vis de l'altération, est l'écoulement de l'eau à travers les roches. Les produits libérés par la percolation sont éliminés, et s'accumulent dans le ballon. Cette accumulation est la deuxième phase du cycle géochimique.

Les phénomènes qui ont présidé pendant les deux périodes à l'élaboration du reliquat et du lessivat, seront donc traités séparément. Mais, d'autre part, deux séries d'éléments sont soumis à ce cycle :

— les carbonates de calcium (et de magnésium), qui sont les constituants essentiels des roches étudiées ;

— et les composés fersiallitiques, constituants mineurs.

Les résultats expérimentaux seront donc repris et discutés suivant ce schéma.

### A. — *Évolution des carbonates*

1. *Nature et vitesse de l'altération. Rôle de différents paramètres.*

a) *Structure de la roche-mère et nature du processus de décarbonatation.*

L'examen des reliquats et de l'eau de percolation, l'étude du bilan des exportations, et la détermination minéralogique des lessivats, montrent que :

— la craie est altérée, en grande partie sous l'influence d'un *phénomène physique*,

— tandis que le calcaire dur et la dolomie manifestent des effets attribuables à un *phénomène chimique de dissolution.*

Le processus dominant est très facilement relié à la structure de la roche-mère :

— dans la craie, l'observation pétrographique met en évidence des microgranules sans ciment apparent. Il s'ensuit une faible cohésion de la roche, donc une division mécanique très intense sous l'effet des eaux de percolation. Les particules séparées ayant une masse très faible (diamètre de l'ordre du micron, et densité apparente $\simeq$ 1,60), peuvent être aisément entraînées en suspension. Toutefois, ce phénomène n'exclut pas une dissolution partielle du carbonate de calcium.

— Le calcaire dur et la dolomie sont constitués d'oolites assemblées par un ciment microgranulaire. Une division mécanique des particules n'est plus possible, et c'est le phénomène de dissolution qui l'emporte.

Toutefois, à la surface des reliquats de dolomie, on a observé des cortex sableux à très forte « détachabilité ». Ces particules représentent essentiellement des oolites, mais il apparaît également des cristaux du ciment dolomitique, de taille comprise entre 60 et 90 µ. *La dissolution s'effectue donc préférentiellement sur les plus petits microgranules du ciment, et elle n'est pas en relation avec la nature minéralogique du matériau.*

Mais il faut remarquer que le cortex des oolites est constitué de cristaux de dimensions très inférieures à ceux du ciment. Ces microgranules du cortex seraient

plus résistants à l'altération grâce à la structure de l'oolite, qui assurerait une cohésion plus élevée. Il est possible également, que les argiles décelées à l'analyse minéralogique, entrent dans la constitution du cortex, et protègent les microgranules dolomitiques.

b) *Influence de la préparation des échantillons sur la solubilité.*

Le concassage des roches influe sur l'altération par la surface offerte à l'eau de percolation. Toutefois, il semble que, dans cette expérience, la surface ait été suffisante pour saturer la solution.

Mais d'autre part, le concassage peut créer des fissures, qui, en particulier pour la craie, faciliteraient la division mécanique et l'entraînement en suspension. De plus, ce concassage peut entraîner des désordres dans les cristaux, et favoriser la formation de surfaces super-solubles (BERNER, 1967 ; HSU, 1967). Ce phénomène expliquerait les quantités plus élevées de lessivats obtenues au cours des deux premiers cycles (cf. fig. 4 et 6).

c) *Rôle de la nature minéralogique des carbonates et vitesse d'altération.*

A partir des valeurs des constantes d'équilibre, on peut calculer la solubilité comparée de la calcite et de la dolomite dans les conditions de l'expérience. Ce calcul a été fait par YANAT'EVA (SCHOELLER, 1962) pour des températures croissantes. Pour une pression partielle d'une atmosphère, les résultats montrent qu'aux basses températures, la solubilité de la calcite est supérieure à celle de la dolomite, tandis qu'au-dessus de 55°C, la dolomite devient plus soluble que la calcite. Pour des pressions partielles de $CO_2$ inférieures, cette température d'inversion est abaissée.

Les altérations étant effectuées avec une eau carbonique, sous une pression partielle de $CO_2$ d'environ 0,8 atmosphère, la température d'inversion est inférieure à 55°C ; donc pour les conditions thermiques de l'expérience (température de l'eau de percolation voisine de 50°C à 55°C), la solubilité de la dolomite est supérieure à celle de la calcite.

Les résultats expérimentaux des altérations du calcaire dur et de la dolomie concordent donc avec la théorie.

d) *Dissolution de la dolomie et phénomène de dédolomitisation.*

Le bilan des exportations de la dolomie a montré que le magnésium est éliminé plus rapidement que le calcium (fig. 8). Ces résultats sont en accord avec les données de l'analyse chimique des cortex (tabl. 5) : il y a enrichissement relatif en calcium. De même, les dépôts du fond du manchon montrent une augmentation de la teneur en calcium : il y a précipitation à ce niveau d'une partie des éléments dissous, ce qui va encore dans le sens de l'enrichissement en magnésium de la solution d'illuviation.

Mais l'analyse minéralogique ne décèle que des traces de calcite dans les cortex d'altération (tabl. 4). Il y a donc, sur les surfaces des fragments de roches, dissolution de la dolomite. Le magnésium est lixivié préférentiellement, tandis que le carbonate de calcium en excès reste sous forme amorphe. Une très faible partie de ce carbonate de calcium commence toutefois, à recristalliser. Ce phénomène qui est donc l'inverse de la dolomitisation, est appelé *dédolomitisation.*

Ce processus serait favorisé par la présence d'ions sulfates (FRIEDMAN, SANDERS, 1967). Mais il peut très bien se produire uniquement sous l'action d'une eau carbonatée, puisque le carbonate de magnésium est plus soluble que le carbonate de calcium (KLINE, 1929 ; FREAR, JOHNSTON, 1929). En effet, les valeurs des produits de solubilité données par ces auteurs sont :

$$K_{MgCO_3} = 1.\,10^{-5}$$
$$K_{CaCO_3} = 4{,}8.\,10^{-9}$$

d'où

$$\left(\frac{Mg^{++}}{Ca^{++}}\right) = 2{,}2.\,10^{3}$$

Même si l'on admet l'augmentation de la solubilité du calcium grâce à divers facteurs physico-chimiques, le rapport Mg/Ca sera toujours supérieur à 1.

*Le processus d'altération de la dolomie dans l'archétype expérimental relève donc d'une dédolomitisation sous l'influence du gaz carbonique dissous* en raison de la lixiviation plus rapide du magnésium. Ce phénomène de migration préférentiel de $MgCO_3$ a déjà été observé dans les sols : sous l'action de l'eau de percolation dans les sols calci-magnésiques argileux du Der, le magnésium est lixivié plus rapidement que le calcium, en milieu basique ; il en résulte une désaturation magnésienne du complexe absorbant (DURAND, DUTIL, 1971). Au contraire, l'évaporation à partir d'une nappe bicarbonatée calci-magnésique dans la plaine du Tadla (Maroc), entraîne une précipitation du carbonate de calcium ; la solution du sol enrichie en magnésium, sature le complexe absorbant des horizons supérieurs en cet élément (LEPOUTRE et SAUVAGEOT, 1969).

2. *Accumulation et synthèse des carbonates.*

La présence simultanée de calcite et d'aragonite dans les lessivats du calcaire dur et de calcite, d'aragonite et de dolomite dans les lessivats de la dolomie, pose le problème des conditions de synthèse de ces minéraux. En effet, ces minéraux se forment dans le ballon d'accumulation à partir des solutions d'illuviation par suite du départ de $CO_2$ sous l'effet de l'ébullition et de l'augmentation de la concentration par évaporation.

Ces néoformations ont été étudiées par de nombreux auteurs et les résultats sont parfois contradictoires. Trois articles (TAFT, 1967 ; WOLF *et al.*, 1967 ; HSU, 1967) passent en revue les facteurs physico-chimiques pouvant avoir une influence sur les synthèses et les inversions des carbonates. Ces facteurs sont les suivants :

— l'addition d'un ion commun : $Ca^{++}$, ($Mg^{++}$), ou $CO^{3=}$,
— la température et l'effet de solvatation de l'eau,
— le pH de la solution,
— le rapport en poids aragonite/magnésium,
— la présence d'ions étrangers, en particulier $Sr^{2+}$, $Ba^{2+}$, $Pb^{2+}$, $Mn^{2+}$, $SO_4^{=}$, $Mg^{2+}$,
— la présence de chlorure de potassium ou de sodium,
— la présence d'une matrice argileuse enrobant les squelettes minéraux.

A cette liste, il faut ajouter le degré de sursaturation de la solution-mère (CLOUD, *in* PEDRO, 1964) ; mais cette sursaturation peut être rattachée à l'addition d'un ion commun.

Peu de données ont été obtenues dans les expériences pouvant concerner l'accumulation des carbonates dans le ballon du Soxhlet. Il n'est donc pas possible actuellement d'en donner une explication complète. Toutefois, on peut déjà dire quelques mots sur l'action d'un certain nombre de facteurs.

a) *L'action de la température.*

— De hautes températures favoriseraient la formation simultanée de calcite et d'aragonite (WRAY, DANIELS, 1957 ; GOTO, 1961 ; BARON, 1960). Ces observations, qui s'opposent à celles de TAFT (1967), sont en accord avec les résultats obtenus pour les lessivats du calcaire dur.

— D'autre part, des expériences de synthèse ont montré que la formation de la dolomite était facilitée par des températures élevées, comprises entre 50°C et 150°C (BARON, 1960). Donc, dans les lessivats de dolomie, la formation de dolomite a pu être favorisée dans ce milieu caractérisé par une ébullition permanente.

b) *L'influence du pH de la solution* (tabl. 7).

Pour le calcaire dur, les résultats n'indiquent pas de relation entre la nature du carbonate de calcium formé et le pH, contrairement à ce qui est indiqué par plusieurs auteurs (GOTO, 1961 ; TAFT, 1967).

Dans l'équilibre dolomite-calcite, l'influence du pH n'est pas connue (HSU, 1967) ; et il en est de même pour l'équilibre dolomite-calcite-aragonite. On peut cependant remarquer que dans les lessivats de dolomie, le pH de la solution est beaucoup plus tamponné. Il aurait donc une faible influence sur la nature minéralogique des carbonates formés.

c) *L'influence du magnésium.*

— L'ion $Mg^{2+}$ favoriserait la genèse de la calcite (GOTO, 1961). D'après les résultats obtenus pour les lessivats du calcaire dur (tabl. 6 et 7), cette relation serait vérifiée. Ces données infirmeraient l'action favorable de $Mg^{2+}$ dans la formation (MONAGHAN et LYTLE, 1956 ; DONER et PRATT, 1969) ou la conservation (TAFT, 1967 ; de GROOT et DUYVIS, 1966) de l'aragonite métastable.

— Par ailleurs, quand la concentration de Mg est approximativement égale à celle de Ca, ce qui doit avoir lieu dans la solution d'accumulation de la dolomie, l'aragonite semble prédominer sur la calcite (MURRAY, 1954). Or, des résultats inverses ont été mis en évidence (tabl. 6).

Le problème de l'influence de $Mg^{++}$ ou de sa concentration reste donc encore posé.

## B. — *Évolution des composés fersiallitiques*

Ces constituants sont présents en faible quantité dans les roches carbonatées étudiées. Toutefois, leur comportement est intéressant, dans la mesure où il paraît constituer le phénomène caractéristique de l'évolution d'un substratum calcaire (PEDRO, 1970).

1. *L'évolution du fer.*

Pour la craie et le calcaire dur, le fer semble éliminé approximativement à la même vitesse que le carbonate de calcium. Mais pour la dolomie, cette lixiviation du fer serait inférieure à celle des carbonates.

D'autre part, l'étude chimique a montré un enrichissement des cortex, très prononcé surtout pour la craie.

Or, il a été constaté dans la craie qu'il y avait une évolution minéralogique des oxydes de fer, après diffusion dans la roche. Il y a donc, dans les conditions expérimentales de l'étude, diffusion des oxydes ferrugineux les moins cristallisés vers la surface des roches, avec accumulation relative, et changement de la forme minéralogique, tout au moins pour la craie. Ce processus se traduit par une coloration rouge plus ou moins accentuée de la roche ; c'est le phénomène de rubéfaction, qui se produit dans un milieu globalement carbonaté.

Mais il avait été constaté que le rougissement de surface était beaucoup plus accentué pour le calcaire dur et la dolomie. Or, pour ces deux roches, l'accumulation relative de fer en surface est plus faible que pour la craie.

Ces faits doivent être rapprochés des observations pétrographiques effectuées sur le cortex de la craie ; dans ce cortex les granules ferrugineux n'apparaissent qu'à environ 0,20 mm de la surface. Donc, à proximité de la surface des carbonates tendres, l'évolution des composés ferrugineux serait modifiée.

2. *Les minéraux argileux néoformés ou hérités.*

Deux espèces minérales ont été mises en évidence dans les lessivats et les dépôts des manchons :

— la kaolinite, dans le dépôt du fond de manchon obtenu à partir de la craie (tabl. 4) ;

— et des phyllites 2/1 de type talc-saponite dans les lessivats de dolomie (tabl. 6).

La kaolinite a été décelée dans la roche-mère crayeuse ; elle est donc héritée. Par contre, les argiles de type talc-saponite ont été néoformées à partir des solutions d'illuviation ; ces minéraux se forment aisément en milieu basique (Millot, 1964), comme cela a été montré antérieurement au cours d'expériences similaires (Pedro et Bitar, 1966).

## V. — CONCLUSION

Les caractéristiques thermo-hydriques d'un climat chaud et humide ont été reproduites au cours de l'altération expérimentale de trois roches-mères carbonatées.

D'après les résultats obtenus, *l'évolution de la fraction carbonatée de la roche-mère* semble conditionnée par trois facteurs essentiels :

— la cohésion des particules de la roche, ce qui se traduit sur le terrain par la dureté,

— la nature minéralogique des carbonates,

— la pression partielle de $CO_2$.

— Dans les conditions de l'expérience, la division mécanique de la craie a été le résultat de l'intensité du lessivage. En conséquence, on peut s'attendre à ce que l'altération des calcaires friables soit due principalement à un phénomène physique, en liaison avec la cohésion de la roche.

— Par contre, l'altération des roches compactes est essentiellement sous la dépendance de la dissolution. C'est pourquoi la *nature minéralogique des carbonates* intervient. Ainsi, en zone tropicale, la dolomie s'altérera beaucoup plus rapidement

que le calcaire. Au contraire, à partir des résultats théoriques, qui devront être confirmés par une étude expérimentale, on peut prévoir que, sous climat froid, les vitesses d'altération seront inversées.

Les expériences ont également montré que le magnésium est éliminé de la dolomie plus rapidement que le calcium. Ce résultat est dû à une solubilité de $MgCO_3$ supérieure à celle de $CaCO_3$, quelle que soit la température ; c'est la dédolomitisation.

Enfin, dans cette dissolution des roches carbonatées, *la pression partielle de* $CO_2$ a une très grande influence. C'est pourquoi, tout processus pouvant augmenter la tension en gaz carbonique au niveau de la roche aura une action très forte sur l'altération.

Les observations ont porté principalement sur l'évolution des composés carbonatés. Mais *l'évolution des composés fersiallitiques* n'est pas sans intérêt : ces constituants mineurs semblent se comporter d'une façon identique dans les roches carbonatées ou purement silicatées. Ainsi, les expériences conduites dans des conditions typiquement tropicales humides ont montré une dissolution très élevée de la silice, et une accumulation relative de fer. Ces résultats sont en accord avec les processus ferrallitiques.

*Les fractions carbonatées et fersiallitiques* évoluent donc simultanément. Les carbonates ont une dynamique qui est fonction, en première approximation, de la dureté de la roche-mère et du climat. Au contraire, les composés fersiallitiques évoluent principalement sous l'influence du climat.

Bien que les résultats obtenus dans cette première série d'expériences soient encore fragmentaires, il apparaît que leur utilisation peut apporter une contribution à l'établissement d'une hiérarchie des critères de classification des sols calcimagnésiques.

*Reçu pour publication en mars 1971.*

## REMERCIEMENTS

Les déterminations minéralogiques par diffraction des rayons X et analyse thermique différentielle ont été effectuées au Laboratoire des Sols du C. N. R. A. (Versailles).

Les auteurs en remercient M. G. PEDRO et ses collaborateurs.

## SUMMARY

### INITIAL RESULTS OF EXPERIMENTAL WEATHERING OF CALCAREOUS AND DOLOMITE ROCKS

Weathering of three carbonate rocks (chalk, hard limestone and dolostone) was carried out experimentally in soxhlets, in a carbon dioxide atmosphere and hydrothermal conditions simulating a tropical climate.

Loss figures show that the weathering rate is governed by the cohesion of the carbonate particles, *i. e.*, the hardness of the rock. The chalk is attacked by essentially physical phenomena ; in the case of hard limestone and dolostone, the loss is engendered by the chemical process of solution.

In the experimental conditions, dolostone was dissolved more rapidly than hard limestone ; in a cold climate, based on theoretical data, the reverse may be expected. This decomposition of oolitic dolostone is most evident with the smal lest crystals of the dolomitic binder, and is not related to the mineralogical nature of the material.

Following the decomposition of the dolomite, the magnesium is lixiviated more rapidly than the calcium, resulting in a relative enrichment of calcium carbonate in the residue cortex ; this carbonate crystallizes. This illustrates the phenomenon of dedolomitization, which governs the weathering process of dolostone.

Iron/silicon allitic compounds develop at the same time as the carbonate compounds, apparently in much the same way as pure silicate rocks.

As a first approximation, it was concluded that if carbonate compounds develop under the influence of climate in the same manner as iron/silicon allitic compounds, the hardness of the rock is also an important factor confronting the aggressivity of the environment.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ERSTE ERGEBNISSE ÜBER DIE EXPERIMENTELLE VERWITTERUBG VON KALK- UND DOLOMITHALTIGEN GESTEINEN

Die Verwitterung von drei, kohlensauren Kalk enthaltenden, Gesteinen (Kreide, harter. Kalkstein, Dolomit) wurde experimentell in Soxhlet-Apparaten unter Kohlendioxyd-Atmosphäre und unter Wärme - und Feuchtigkeitsbedingungen, die einem tropischen Klima nahekommen, durchgeführt.

Die Bilanzen der Extraktionen zeigen, dass die Kohäsion der Karbonatteilchen, das heisst die Härte des Gesteins, den Verwitterungstyp bestimmt : der Angriff der Kreide beruht im wesentlichen auf einem physikalischen Vorgang, während für den Hartkalkstein und den Dolomit die Extraktion die Folge eines chemischen Lösungsvorgangs ist.

Unter den Versuchsbedingungen löst sich der Dolomit schneller als der Hartkalkstein ; ausgehend von den theoretischen Gegebenheiten kann jedoch unter einem kalten Klima das umgekehrte Ergebnis vorausgesehen werden. Diese Auflösung des oolithischen Dolomits betrifft vorzugsweise die kleinsten Kristalle des dolomitischen Bindemittels und steht nicht in Beziehung zur mineralogischen Natur des Gesteins.

Nach Auflösung des Dolomits wird das Magnesium schneller als das Kalzium ausgelaught. Dies führt dazu, dass auf der Rinde der übrigleibenden Gesteinsmasse eine relative Anreicherung an Kalziumkarbonat zu verzeichnen ist. Dieses Karbonat kristallisiert aus : es ist der Vorgang der Entdolomitisierung, der den Verwitterungsprozess des Dolomits regiert.

Die Eisen Sialverbindungen verändern sich zugleich mit den Karbonatverbindungen un wie es scheint, nach genau den gleichen Prozess wie die reinen Silikatgesteine.

Aus didsen Ergebeissen lässt sich nach einer ersten Schätzung schliessen, dass wenn sich di Karbonnatverbindungen unter klimatischem Einfluss im gleiche Sinne wie die Eisen - Sialver bindungen verändern, die Härte des Gesteins ebenfalls ein wichtiger Faktor gegen die Aggressivität der Umwelt darstellt.

## РЕЗЮМЕ

### Первые результаты экспериментального выветривания известковых и доломитовых пород.

Р. ДЮРАН, П. ДЮТИЛЬ.

Выветривание трех известковых пород (мел, твердый известняк, доломит) было проведено экспериментально в сокслетах, в атмосфере углекислого газа, в термо-динамических условиях приближающихся к условиям тропического климата.

Балансы выноса показывают что спаянность известковых частичек, иначе говоря твердость породы, предрасполагает к тому или иному типу выветривания : мел, например, выветривается благодаря почти исключительно явлениям физическим, в то время как в случае твердого известняка или доломитовых пород, экспорт представляет последействие химического явления растворения.

В условиях опыта, доломитовые породы растворяются быстрее твердого известняка; в условиях холодного климата, основываясь на теоритических данных, — можно предвидеть обратный результат. Это растворение оолитических доломитовых пород предпочтительно касается самых мелких кристаллов доломитового цемента и не имеет никакой связи с минералогической природой материала.

После растворения доломита, магний экспортируется быстрее кальция. В результате, на уровне оболочки остатка происходит относительное обогащение кристаллизующимся углекислым кальцием : это, явление дедоломитизации, которое управлает процесом выветривания доломитовых пород.

Железо-кремне-алюминиевые соединения эволюционируют одновременно с карбонатами, и, как кажется, следуя тому-же процессу, что и породы чисто кремнистые.

В первом приближении можно заключить, основываясь на полученных результатах, что если карбонатные соединения эволюционируют под влиянием климата, также как и соединения железо-кремне-алюминиевые, твердость породы является, в свою очередь, очень важным фактором противостоящим агрессивности среды.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BARON G., 1960. Sur la synthèse de la dolomite. Application au phénomène de dolomitisation. *Rev. Inst. Franç. du Pétrole*, **15**, 1, 3-68.

BERNER R. A., 1967. Comparative dissolution characteristics of carbonate minerals in the presence and absence of aqueous magnesium ion. *Amer. J. of Sci.*, **265**, 45-70.

C. P. C. S., 1967. *Classification des sols*. Ronéo E. N. S. A.-Grignon.

DONER H. E., PRATT P. F., 1969. Solubility of calcium carbonate precipitated in aqueous solutions of magnesium and sulfate salts. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 5, 690-693.

DUCHAUFOUR Ph., 1968. *L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils*. Masson et C^ie^, Paris, 50-57.

DURAND R., DUTIL P. 1971. Évolution des sols en milieu calci-magnésique argileux. Le pays du Der (Haute-Marne). *Sci. Sol*, 1, 65-78.

FREAR G. L., JOHNSTON J., 1929. The solubility of calcium carbonate (calcite) in certain aqueous solutions at 25°. *Amer. Chem. Soc. J.*, **51**, 2082-2093.

FRIEDMAN G. M., SANDERS J. E., 1967. Origin and occurrence of dolostones in *Carbonate Rocks*, G. V. Chilingar, H.J. Bissell, R. W. Fairbridge (Éditeurs), A 300-302, Elsevier, Amsterdam.

GARRELS R. M., CHRIST C. L., 1967. *Équilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses* (Traduit par R. Wollast). Gauthier-Villars, Paris, 335 p.

GOTO M., 1961. Some mineralo-chemical problems concerning calcite and aragonite, with special reference to the genesis of aragonite. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. **4**, 1 (4), 571-640.

GROOT K. DE, DUYVIS E. M., 1966. Crystal form of precipitated calcium carbonate as influenced by adsorbed magnesium ions. *Nature*, **212**, 183-184.

HSU K. J., 1967. Chemistry of dolomite formation in *Carbonate Rocks*, G. V. Chilinger, H. J. Bissell, and R. W. Fairbridge (Éditeurs), **B**, 169-191. Elsevier, Amsterdam.

JUNG J., 1969. *Précis de pétrographie*. 100-122, 3^e^ édition, Masson et C^ie^, Paris.

KERN D. B., 1960. The hydratation of carbon dioxide. *J. Chem. Educ.*, **37**, 14-23.

KLINE W. O., 1929. The solubility of magnesium carbonate (nesquehonite) in water at 25° and pressures of carbon dioxide up to one atmosphère. *J. Amer. Chem. Soc.*, **51**, 2093-2097.

LEPOUTRE B., SAUVAGEOT A., 1969. Une cause de la saturation magnésienne des argiles dans le sol : l'hydromorphie temporaire de saison chaude. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, **7**, 2, 183-201.

MILLOT G., 1964. *Géologie des argiles*, 383 p., Masson et Cie, Paris.

MOLLAZAL Y., 1961. Petrology and petrography of Ely Limestone in part of Eastern Great Basin. *Brigham Young Univ. Res. Studies, Geol. Serv.*, **8**, 3-35.

MONAGHAN P. H., LYOLE M. L., 1956. The origin of calcareous Tolites. *J. Sediment. Petrol.*, **26**, 111-118.

MORET L., 1958. *Manuel de paléontologie animale*. 112 p., 4e édition, Masson et Cie, Paris.

MURRAY J. W., 1954. The deposition of calcite and aragonite in caves. *J. Geol.*, **62**, 481-492.

PEDRO G., 1967. Contribution expérimentale à l'étude du rôle du calcaire dans l'évolution géochimique des sols. *Trans. 9th Congr. Int. Soil Sci. Soc.*, Adelaide, Australia, **4**, paper 53, 511-522.

PEDRO G., 1970. Sur l'altération des matériaux calcaires en conditions « latérisantes » : étude expérimentale de l'évolution d'une marne illitique. *C. R. Acad. Sci*, Paris, Série D, **270**, 36-38.

PEDRO G., BITAR K. E., 1966. Contribution à l'étude de la genèse de sols hypermagnésiens : recherches expérimentales sur l'altération chimique des roches ultrabasiques (serpentinites). *Ann. agron.*, **17**, 6, 611-651.

PEDRO G., JAMAGNE M., BEGON J. C., 1969. Mineral interactions and transformations in relation to pedogenesis during the Quaternary. *Soil Science*, **107**, 6, 462-469.

SCHOELLER H., 1962. *Les eaux souterraines*, 283 p., Masson et Cie, Paris.

TAFT W. H., 1967. Physical chemistry of formation of carbonates in *Carbonate Rocks*, G. V. Chilingar, H. J. Bissell, and R. W. Fairbridge (Éditeurs). **B**, 151-167, Elsevier, Amsterdam.

WOLF K. H., CHILINGAR G. V., BEALES F. W., 1967. Elemental composition of carbonate skeletons, minerals, and sediments in *Carbonate Rocks*, G. V. Chilingar, H. J. Bissell, and R. W. Fairbridge (Éditeurs). **B**, 85-110, Elsevier, Amsterdam.

WRAY J. L., DANIELS F., 1957. Precipitation of calcite and aragonite. *J. Amer. Chem. Soc.*, **79** 2031-2034.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (4), 425-449.

# ESSAI DE PRÉVISION DE L'ORIENTATION DE LA PRODUCTION AGRICOLE DANS DIVERSES RÉGIONS NATURELLES, EN FONCTION DES FACTEURS ÉCOLOGIQUES

A. LANGLET

avec la collaboration technique de R. VIARD

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Toulouse, I. N. R. A.,*
*31 - Castanet*

---

## RÉSUMÉ

Pour tenter de prévoir globalement par région à l'échéance de 1980 la nature et le volume des productions agricoles possibles en fonction des seuls facteurs écologiques, une hiérarchisation de leur action sur les cultures a été envisagée.

Cette démarche a nécessité les étapes suivantes :

— inventaire et étude des principaux caractères des climats et des terrains,

— examen des aptitudes culturales par région où le climat et les terrains sont suffisamment homogènes,

— appréciation des potentialités de production des principales cultures dans chaque région, et de l'occupation optimale du sol du point de vue écologique,

— étude en quelques points précis de certains aspects des systèmes de cultures (notamment pour ce qui concerne l'alimentation en eau des cultures d'été, et le comportement physique de certains sols d'alluvions).

Cette démarche de détermination des potentialités a donc étudié directement les rapports Plante Milieu : Milieu climat terrain → Rendement. Les relations avec les techniques culturales et l'environnement socio-économique ne sont pas traitées ici.

Des références très diverses ont été recueillies, en plus des données relatives au climat, au terrain : résultats d'essais et de démonstrations, résultats d'enquêtes dans certains cas, données recueillies par les organismes de gestion, données obtenues auprès d'experts.

Il a pu être indiqué par région : une potentialité de production par type de culture, une occupation « optimale » du sol selon les contraintes écologiques. La méthode utilisée, l'utilisation qui a été faite des résultats sont présentés et discutés.

---

## INTRODUCTION

### *Le problème posé et ses difficultés*

L'évolution très rapide de l'agriculture amène les pouvoirs publics, aussi bien que les responsables professionnels agricoles, à remettre en cause de nombreuses conceptions traditionnelles, surtout dans les régions qui n'ont pas atteint un équilibre bien défini. Tel est notamment le cas de la région Midi-Pyrénées, et lors des travaux régionaux de préparation du VI[e] Plan, qui devaient également prendre en compte l'horizon 1980-1985, il a été posé à l'ensemble d'un groupe de travail auquel nous avons participé le problème de connaître approximativement la nature, le volume et la localisation des principales productions agricoles possibles.

Il intervenait notamment les réalités suivantes :

— le niveau de progrès technique et sa pénétration sont très hétérogènes selon les régions naturelles, les cultures, et même selon les exploitations d'une même région pour une même culture. Prolonger les tendances actuelles, ou se servir de statistiques, de production est donc insuffisant, puisqu'aucune de ces 2 méthodes ne reflète la diffusion hétérogène, quoiqu'assez rapide, du progrès technique ;

— quelques productions, pourtant assez largement pratiquées encore actuellement, sont mal adaptées aux caractères écologiques de certaines régions. C'est le cas par exemple du maïs sur les terrasses alluviales peu profondes de la Garonne (boulbènes). La « rentabilité » de telles productions est très aléatoire, et elles vont certainement régresser assez rapidement ;

— les mouvements de population active agricole doivent amener dans certaines régions des systèmes de culture plus extensifs (montagnes, plateaux calcaires des Causses...), alors qu'au contraire pour d'autres régions, une intensification serait nécessaire. Il importe alors de savoir si les caractères de climat et de terrain (nature du sol, topographie) le permettent.

Le contexte dans lequel ces travaux se situent est donc caractérisé par une évolution rapide des techniques et des productions (mais avec de fortes disparités), par le manque de données statistiques reflétant cette évolution, par l'intervention simultanée des facteurs écologiques et techniques, ainsi que des notions de rentabilité.

### *Estimation des potentialités régionales*

Dans ce groupe de travail, il nous revenait l'estimation des potentialités de production, et l'étude de l'occupation du sol. Seules les contraintes écologiques et agronomiques ont été considérées pour déterminer très grossièrement des assolements possibles dans des exploitations types, compte tenu des rapports de prix voisins de ceux qui existent actuellement.

Ces potentialités sont conçues comme étant accessibles à la majorité des agriculteurs, grâce aux meilleures techniques culturales connues, les structures d'exploitations et les moyens financiers n'étant pas des facteurs limitants.

Cette estimation devant être réalisée dans des délais très courts, nous n'avons pu utiliser que les éléments suivants pour tenter de donner une réponse :

— facteurs et conditions écologiques permettant de dégager à l'échelle des régions naturelles les contraintes, les caractères favorables, les principaux facteurs généraux de progrès (niveau et qualité de la fertilisation, aménagements fonciers divers, irrigation, assainissement...), les aptitudes culturales ;

— analyse de l'action des facteurs et des conditions écologiques, au moyen d'expérimentations assez élaborées, déjà existantes depuis plusieurs années, notamment dans les situations « marginales » de mauvaise adaptation des cultures ;

— « avis d'experts », résultats de gestion, résultats d'expérimentations simples, mais plurilocales. Les caractères écologiques relatifs à ces expérimentations permettent de caractériser un certain nombre de situations agricoles, ainsi que les rendements qui s'y rapportent.

Nous voudrions indiquer brièvement ici le parti que nous avons pu tirer de ces éléments d'origines très diverses, discuter quelque peu leurs possibilités d'utilisation et dégager ainsi diverses approches permettant de mieux cerner ces problèmes très globaux. Après avoir passé en revue la nature des données recueillies, nous confronterons les résultats fournis et nous essaierons de porter un jugement d'ensemble.

## A. — DONNÉES UTILISÉES

Les éléments recueillis et analysés se répartissent en 3 groupes :

### 1. — *Facteurs et conditions écologiques*

a) *Climat.*

— Températures (GARNIER, 1967)

Moyennes annuelles, moyennes des mois les plus caractéristiques (précocité, possibilités de récolte tardive).

Gelées : fréquence et dates.

— Déficit climatique (évapotranspiration potentielle moins précipitations).

En plus des données annuelles et mensuelles concernant les précipitations (GARNIER, 1967), de leurs variations dans l'espace et le temps, nous disposons pour le déficit hydrique climatique de bilans mensuels et du cumul sur l'ensemble de la végétation (LECARPENTIER et *al.*, 1964 ; PUECH, 1966).

— Grêle : zones les plus fréquemment touchées par les orages.

b) *Terrain.*

— Topographie (BRUNET, 1965).

Évaluation des surfaces dont les pentes sont comprises, par exemple, entre 0 et 5 p. 100, 5 à 8 p. 100, 8 à 11 p. 100, etc.

S'il importe de savoir qu'en un point la pente est de 10 ou 20 p. 100, il est en effet tout aussi important de déterminer quelle surface d'une région donnée est en pente de 10 p. 100, de 20 p. 100..

— Possibilités d'alimentation en eau des cultures d'été. Il s'agit d'une notion synthétique incluant :

— réserves en eau du sol,

— possibilités d'enracinement des cultures dans le profil (MAERTENS *et al.*, 1966),

— cession plus ou moins rapide de l'eau du sol à la plante (PUECH, 1969),

— nature du sol, principales propriétés physiques et chimiques (BLANCHET *et al.*, 1966), texture, profondeur, pH, structure, réserves minérales, ressuyage, difficultés éventuelles de travail (analyse très sommaire des périodes disponibles pour les travaux, limites Atterberg, importance de la puissance de traction nécessaire...),

— caractères divers : affleurement rocheux, risques d'érosion, charges en cailloux, ennoyage, mouillères...

c) *Essai de synthèse,* par l'examen des principales associations végétales (REY, 1957) permettant parfois de préciser ou confirmer la physionomie globale d'une région naturelle.

### 2. — *Données expérimentales relatives à l'action des facteurs écologiques sur le rendement de quelques cultures*

a) *Alimentation en eau, bilans hydriques et production.*

Depuis 1965, des expérimentations d'irrigation ont été mises en place par la Station d'Agronomie dans la région toulousaine, en situation agrologiques différentes (notamment quant à la réserve en eau utilisable). Ces essais visaient essentiellement à étudier quelles étaient les meilleures modalités d'alimentation en eau du maïs grain, ainsi que du sorgho grain. Les différents termes du bilan hydrique étaient mesurés et contrôlés aussi rigoureusement que possible : évapotranspiration potentielle et réelle, pluies, réserves hydriques des sols, ainsi que leur participation à l'alimentation de la plante. Il a donc été possible de rapporter l'ensemble des données obtenues sur ces cultures, et donc le rendement à des mesures de consommation d'eau.

La méthodologie précise de ces essais et les résultats obtenus ont été publiés par ailleurs (in *Plante, Sol, Climat, et Irrigation,* 1968).

b) *Expérimentation : rotations — comportement du sol.*

Mis en place à l'automne 1965 sur boulbène typique peu profonde (MARTY, 1969) à Plaisance-du-Touch (Haute-Garonne), cet essai avait pour but de dégager l'influence de 5 rotations différentes sur les rendements des diverses cultures sèches ou irriguées, ainsi que sur l'évolution du comportement physique et hydrique du sol au cours d'années climatiques différentes.

La description détaillée et les résultats de cet essai ont été publiés ailleurs (MARTY, FIORAMONTI, 1970).

### 3. — *Avis d'« experts », résultats de gestion et d'expérimentation*

Le groupe de travail a permis la confrontation d'experts d'organismes divers (Services de Vulgarisation, SAFER, Administration...) ayant une connaissance agronomique de la région suffisamment précise et étendue pour permettre l'obtention de références écologiques ou techniques (rendements...) et leur harmonisation selon les différentes régions.

Certaines références techniques ont pu également être obtenues auprès des Centres de Gestion des exploitations (rendements, systèmes de cultures...), ainsi que des références plus économiques résultant de l'analyse de groupes d'exploitations (pointe, tête, etc.) ou de programmation linéaire.

L'ensemble des essais et démonstrations réalisé par les organismes de développement a pu également être exploité (LANGLET, VIARD, 1969). En effet, avec un certain nombre de précautions, ces résultats nous ont permis de relier globalement les caractères écologiques d'une région à un ensemble de rendements obtenus dans des diverses situations de cette région et donc de contribuer à l'analyse de l'action des facteurs écologiques sur les rendements, mais à une échelle différente de celle envisagée ci-dessus, où l'on considérait plutôt des expérimentations ponctuelles.

## B. — RÉSULTATS

### 1. — *Représentation schématique des facteurs écologiques les plus déterminants Contraintes exercées sur la production agricole et orientations en découlant*

Le recueil des données indiquées ci-dessus a permis de dresser un certain nombre de schémas, qui tracent les grandes lignes des aptitudes culturales des régions en fonction des caractères écologiques.

*Température et topographie : figure 1.*

La conjugaison de ces deux contraintes exclut pour la grande culture les principales régions montagneuses car :

— à partir d'une certaine altitude, la température insuffisante interdit une production végétale importante, sauf peut être pendant l'été. Ceci non seulement par la moyenne annuelle, mais surtout par les moyennes mensuelles d'automne, d'hiver et de printemps ;

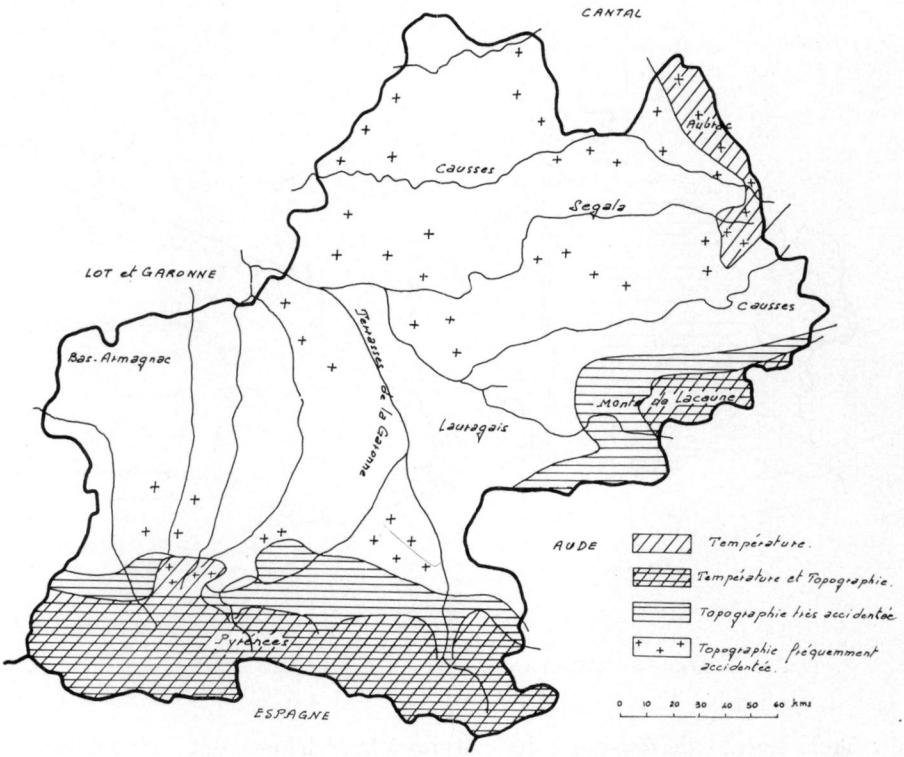



FIG. 1. — *Contraintes de températures et de topographie*

— une topographie trop accidentée ne permet pas d'intensifier suffisamment la culture : elle constitue un frein pour la mécanisation et pour les modifications du milieu par la fertilisation par exemple. Notons que ces contraintes topographiques se retrouvent également, mais à un degré moindre, en dehors des régions montagneuses.

*Résistance des cultures à la sécheresse et comportement physique du sol : figure 2.*

1. *Alimentation en eau :* elle est envisagée ici d'après les 2 termes :

*Climat* : déficit climatique (ETP-P) le moins contraignant, valeurs inférieures à 350 mm
le plus contraignant, valeurs supérieures à 350 mm
et pouvant même atteindre en certains endroits 450 ou 600 mm.

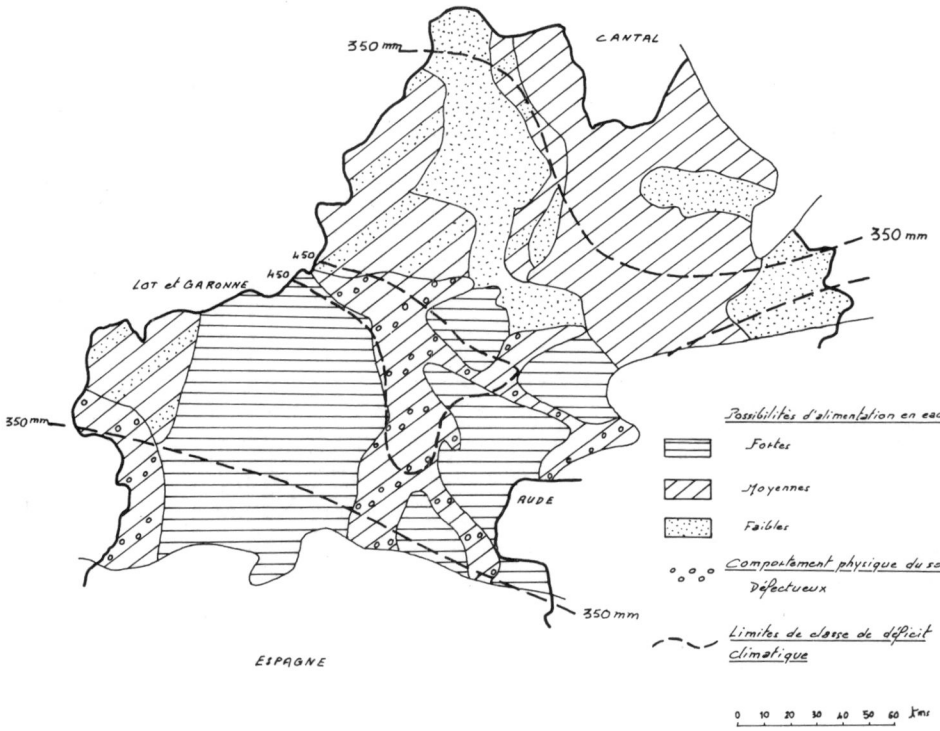



FIG. 2. — *Contraintes d'alimentation en eau et de comportement physique du sol*

*Sol :* Trois niveaux de résistance des cultures à la sécheresse ont été représentés sur le schéma, selon la définition qui en a été donnée dans la première partie.

C'est donc principalement de la combinaison de ces 2 termes climat-sol que va dépendre l'alimentation en eau des cultures dont le cycle, en totalité ou en partie, se déroule durant l'été.

2. *Propriétés physiques du sol :* outre leur intervention sur l'alimentation en eau, les propriétés physiques des sols ont également une action très importante sur :

— les difficultés d'implantation des cultures : périodes disponibles pour les travaux (interaction climat-sol) ; qualité et stabilité des lits de semences... Les effets néfastes de la battance sur les levées se produisent non seulement sur les cultures d'hiver, mais aussi au printemps, pour la levée du sorgho notamment.

— les difficultés de développement, une fois l'implantation réalisée, ennoyage, asphyxie...

Seules les zones où ce comportement physique est le plus contraignant (boulbènes) ont été représentées sur la figure.

*Orientations générales de la production agricole : figure 3 et tableau 1.*

Les aptitudes culturales des différents milieux sont surtout influencées par le degré de prohibition que les contraintes écologiques exercent sur les différentes cultures possibles (HÉNIN, 1953 ; DROUINEAU, 1963).

La figure 3 représente alors les orientations générales de la production agricole dans les différentes régions, telles qu'elles découlent des contraintes figurées dans les figures 1 et 2.

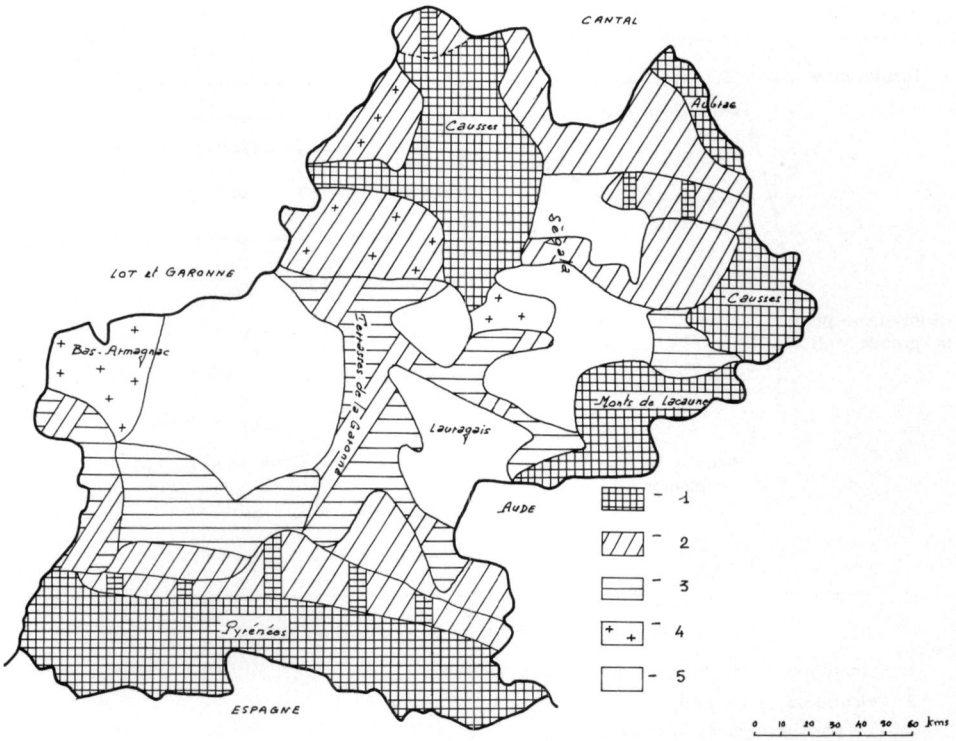


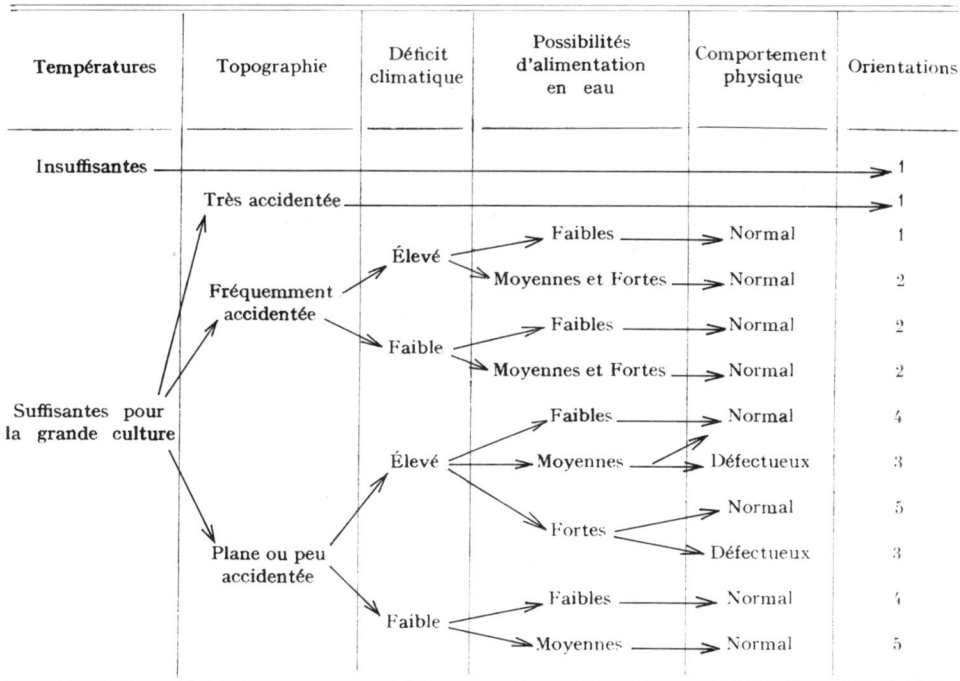

FIG. 3. — *Carte schématique des orientations de la production agricole en culture sèche*

1. Orientation fourragère de type extensif, forêts...
2. Orientation moins extensive :
   — part importante de fourrages
   — quelques possibilités de cultures : céréales d'hiver, cultures d'été
   — certaines cultures spéciales (arbres, vigne) et forêts
3. Orientation basée sur :
   — succession fourrages-céréales
   — cultures d'été possibles selon les situations
   — cultures spéciales possibles (vigne notamment)
4. Orientation avec :
   — part de vigne importante
   — cultures fourragères, céréales d'hiver et oléagineux
   — assez peu de cultures d'été
5. Larges possibilités de culture :
   — cultures fourragères diverses
   — céréales hiver, printemps, oléagineux
   — céréales d'été
   — cultures spéciales variées

TABLEAU I

*Exemple de combinaison des facteurs et des conditions écologiques et orientation de la production agricole* (en culture sèche)

(Pour la définition des facteurs et conditions, se reporter à la première partie : « Données utilisées »).




*Légendes des Orientations* (en culture sèche)

1. Orientation fourragère de type extensif, forêts,...
2. Orientation moins extensive :
   - part importante de fourrages,
   - quelques possibilités de cultures : céréales hiver, culture été,
   - certaines cultures spéciales (arbres, vigne) et forêts.
3. Orientation basée sur :
   - succession fourrages-céréales,
   - cultures d'été possibles selon les situations,
   - cultures spéciales possibles (vigne notamment).
4. Orientation avec :
   - part de vigne importante,
   - cultures fourragères, céréales hiver, oléagineux,
   - assez peu de cultures d'été.
5. Larges possibilités de culture :
   - cultures fourragères diverses,
   - céréales hiver, printemps, oléagineux,
   - cultures d'été,
   - cultures spéciales variées.

Ces orientations ont été obtenues, comme le montre le tableau 1, à partir de cheminements utilisant les différents niveaux des contraintes rencontrées dans le cadre de cette étude.

Les cas les plus extrêmes sont relativement faciles à analyser et à définir : il s'agit en effet de milieux très contraignants comme en (1) avec des systèmes de culture de type « extensif », ou bien des milieux peu contraignants comme en (5), avec là, des systèmes de culture de type « intensif ».

Mais pour les situations intermédiaires, l'orientation qui paraît souhaitable est beaucoup plus difficile à déterminer. Ce sont alors surtout les réserves hydriques des sols et leur comportement physique qui sont contraignants et il paraît nécessaire d'examiner plus en détail leurs répercussions sur les cultures.

## 2. — *Exemples d'analyses plus détaillées des facteurs et conditions écologiques*

Nous envisagerons donc ici les répercussions des contraintes d'alimentation en eau, et celles liées au comportement physique des sols.

### 1. *Variations du rendement du maïs et du sorgho en fonction du déficit hydrique réel (ETM-ETR).*

Nous utilisons des résultats d'essais installés pendant plusieurs années et dont le but était l'étude des meilleures conditions d'alimentation en eau que l'on pouvait obtenir par l'irrigation (in *Plante, Sol, Climat et Irrigation*, 1968).

Les rendements en grain du maïs et du sorgho décroissent lorsque le déficit réel en eau augmente (fig. 4). Cette relation intègre plusieurs années climatiques, plusieurs stations agrologiques et nous pouvons donc la considérer comme représentative du comportement de ces cultures dans des conditions variant assez largement.

Remarquons que ces résultats peuvent être prolongés par des travaux d'ordre plus économique publiés dans la région (COMBRET *et al.*, 1969 ; GIGNOUX, CAVALAN, 1970). Ils montrent que la marge brute à l'hectare de culture de maïs décroît avec le rendement obtenu. Il ne nous appartient pas de discuter ici ces ébauches d'analyses économiques ; mais il apparaît qu'un « seuil de rentabilité » peut être fixé autour de 900 F/ha, ce qui correspondrait approximativement à un rendement en maïs de 35 à 40 q. Ces seuils semblent être en accord avec les indications des organismes de gestion, mais ils ne sauraient être pris pour des indications absolues.

Cependant, il s'ensuit que ces cultures ne peuvent être considérées comme des orientations valables dans les terroirs où les rendements inférieurs à cette limite sont trop fréquents.

Un palliatif pourrait être alors l'irrigation de ces cultures : nous verrons dans les résultats qui suivent et dans la discussion que cela ne peut être réalisé partout sans précautions, surtout s'il s'agit d'un aménagement collectif sur de grandes surfaces.

### 2. *Influence de différentes rotations sur les rendements de diverses cultures et comportement physique d'un sol.*

Au cours d'années climatiques différentes, les répercussions de rotations céréalières ou fourragères, avec ou sans irrigation, ont été étudiées sur les rendements des

cultures et sur l'évolution du comportement physique et hydrique d'un sol mal structuré (MARTY, FIORAMONTI, 1970).

Précisons que ces résultats sont obtenus sur les plus mauvaises boulbènes (sols lessivés hydromorphes, souvent à pseudogley), les réserves en eau sont faibles, le déficit hydrique réel important et le comportement physique défavorable (tabl. 2, 3 et 4).

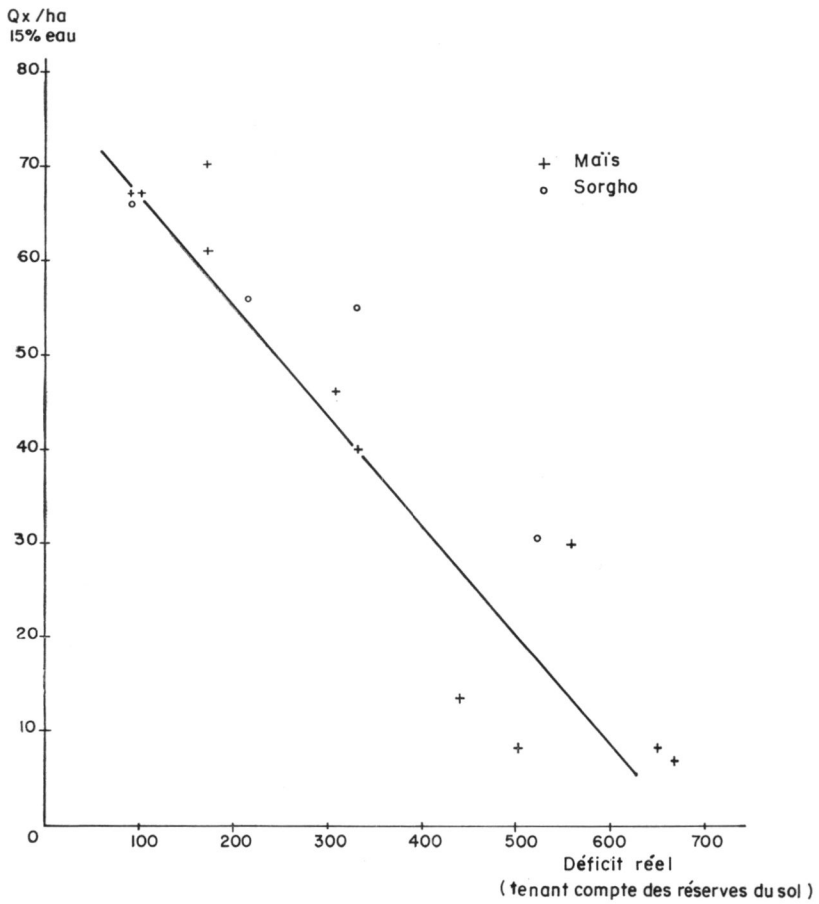



FIG. 4. — *Rendement du Maïs et du Sorgho en fonction du déficit hydrique réel*
R = — 0,928 (H.S.)
(Rdt = — 0,1083$x$ + 78,89; forme linéaire en 1re approximation)

Il apparaît nettement que seule la culture de fétuque a donné des productions intéressantes, indépendamment du problème de la transformation de ces UF (1), que nous n'étudions pas ici. Même en culture sèche et malgré un creux estival assez important, un système de culture fourrager semble meilleur, tant à cause des rendements obtenus et de sa valeur en tant que précédent cultural pour les céréales, que

(1) UF = Unités fourragères.

pour ses conséquences sur les propriétés physiques et hydriques du sol (tabl. 3).

La fétuque a notablement amélioré les propriétés physiques du sol et l'orge après fétuque s'est beaucoup mieux comportée. Cette amélioration a pu être liée à la production d'une plus grande quantité d'humus dans les 10 premiers centimètres.

Le dispositif comportait des parcelles irriguées ; il permettait de juger des améliorations de rendement possibles dues à l'irrigation. En comparant cette situation à d'autres plus favorables au point de vue des réserves hydriques (COMBRET *et al.*, 1969), il apparaît que l'irrigation des cultures d'été (maïs...) est théoriquement possible et qu'elle permet de bon rendements, mais en exigeant dans ces sols à mauvais

TABLEAU 2

*Rendements de la Fétuque et alimentation en eau*

| Années | ETP (mm) | Irrigation (mm) | Rendements de la Fétuque | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Matière sèche (q/ha) | | Unités fourragères | | Nombre d'exploitations | |
| | | | Sec | Irrigué | Sec | Irrigué | Sec | Irrigué |
| 1967 | 940 (1/5 au 30/9) | 470 | 67 | 164 | 3 700 | 9 600 | 3 | 5 |
| 1968 | 480 (16/4 au 9/9) | 235 | 82 | 139 | 4 250 | 7 190 | 4 | 4 |

comportement physique des précautions et de nombreux arrosages.

Sur les cultures fourragères, par contre, des irrigations même moins intensives, mais bien conçues à partir de prairies implantées correctement avec des espèces adaptées (notamment au point de vue de leur résistance aux fortes ETP) permettent de régulariser la production de l'herbe en diminuant le creux estival (tabl. 2).

### 3. — *Dépouillement des résultats d'expérimentation régionale*

Notre analyse a porté jusqu'ici, d'une part, sur l'examen global des répercussions des contraintes écologiques, d'autre part, sur l'étude détaillée du comportement des végétaux dans des situations bien définies. Il importe maintenant de confronter ces deux groupes de données aux résultats obtenus dans le cadre de pratiques agricoles bien contrôlées. Les expérimentations simples réalisées par divers organismes, notamment les services de développement, nous paraissent bien répondre à ce but.

En effet, ces expérimentations diverses (comparaisons de variétés, démonstrations plurilocales, essais de fumure, de désherbage) sont susceptibles de représenter les potentialités telles que nous les avons définies : les techniques culturales sont généralement voisines de l'optimum, et il n'y a ni contrainte financière, ni contrainte de structure (1).

(1) Notons que les dimensions des parcelles, généralement réduites, amènent à des résultats généralement supérieurs à ceux que l'on obtiendrait en grande culture.

TABLEAU 3

*Rendements obtenus en culture sèche selon les rotations*

| Rotations | Maïs<br>Maïs<br>Maïs<br>Orge | Maïs<br>Blé<br>Sorgho<br>Orge | Ray-grass<br>Maïs<br>Blé<br>Orge | Fétuque<br>X 3<br><br>Orge | Blé<br>Maïs<br>Blé<br>Orge |
|---|---|---|---|---|---|
| 1966 | M 10,3 | M 13,8 | RG 82<br>(4 200 UF en<br>2 exploit.) | F 90<br>(4 000 UF en<br>2 exploit.) | B 27,3 |
| 1967 | M 6,3 | B 14,2 | M 9,2 | F 67<br>(3 700 UF en<br>3 exploit.) | M 6,0 |
| 1968 | M grêlé | S 16,8<br>(grêlé) | B grêlé<br>(20 q estimé) | F 82<br>(4 250 UF en<br>4 exploit.) | B grêlé |
| 1969<br>(culture test) | O 22,5 | O 18,2 | O 16 | O 29,2 | O 12,8 |

UF : Unités fourragères
Prairies : q/ha de m. sèche
Céréales : q/ha de grain sec.

TABLEAU 4

*Influence des rotations sur la stabilité structurale* (HÉNIN, 1960)

(Moyennes de 4 répétitions)

| Rotations | Test S | | | Test K | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0-10 cm | 10-20 cm | 20-30 cm | 0-10 cm | 10-20 cm | 20-30 cm |
| MMMO | 5,93 | 5,19 | 5,68 | 1,27 | 1,53 | 1,46 |
| MBSO | 5,65 | 5,39 | 6,36 | 1,58 | 1,20 | 1,10 |
| RMBO | 6,51 | 5,83 | 5,70 | 0,97 | 1,08 | 1,25 |
| FFFO irrigué | 2,89 | 3,89 | 3,78 | 1,58 | 1,50 | 1,43 |
| FFFO sec | 2,90 | 3,89 | 4,27 | 2,02 | 1,69 | 1,65 |
| BMBO | 5,45 | 5,29 | 6,08 | 0,99 | 1,06 | 1,14 |
| Sol nu | 12,20 | 15,32 | 15,84 | 1,06 | 0,80 | 0,93 |
| Fétuque 4e année | 1,42 | — | — | 1,54 | — | — |

Si l'implantation de ces essais représente le mieux possible les différentes situations pédo-climatiques de la région dont on connaît les caractéristiques, si l'on possède suffisamment de données contrôlées sur leur localisation et s'ils sont en nombre suffisant chaque année, le dépouillement de ces résultats peut donner une physionomie globale de la région étudiée.

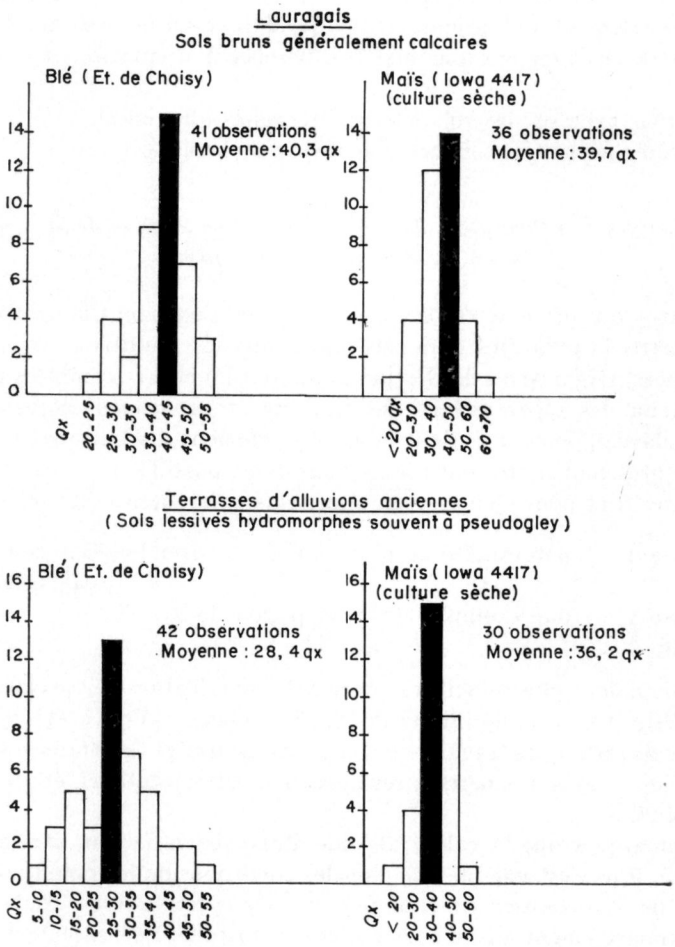



FIG. 5. — *Dépouillement des résultats obtenus en expérimentation*

La figure 5 présente ce dépouillement effectué pour deux cultures Blé et Maïs dans deux petites régions bien caractérisées et suffisamment connues (LANGLET, VIARD, 1969). Elles diffèrent essentiellement par le type de terrain, l'une est composée de terrasses d'alluvions anciennes portant des sols lessivés hydromorphes, parfois à pseudogley, l'autre est une région de coteaux de molasse tertiaire où se sont développés des sols bruns, généralement calcaires.

Ce dépouillement confirme ce qui avait été obtenu précédemment quant au comportement des céréales d'hiver sur les sols lessivés hydromorphes : les rendements y sont le plus fréquemment inférieurs à ceux observés sur les sols bruns formés sur

coteaux. Nous retrouvons donc bien là sur l'ensemble de ces régions les effets des contraintes inhérentes au comportement physique du sol.

Les effets de contraintes hydriques peuvent également se retrouver sur le maïs : les rendements sont plus souvent élevés sur les sols bruns où les contraintes hydriques sont moins fortes. Cependant la différence est ici moins sensible, car l'échantillonnage étudié pour les sols lessivés comprend surtout des situations favorables.

Ajoutons également qu'une enquête rapide, réalisée sur un petit nombre d'exploitations de tête de ces 2 régions a montré la différence d'orientation de leurs systèmes de culture :

— plus fourrager sur les sols lessivés (terrasses alluviales),
— plus céréalier sur les sols bruns (coteaux molassiques).

### 4. — *Exemples de potentialités de production et d'occupation de la S.A.U.* (1) *selon les contraintes écologiques*

Le tableau 5 qui présente ces exemples est donc finalement la synthèse de tous les résultats partiels présentés ci-dessus, ainsi que des multiples « avis d'experts » et autres données (Organismes de Gestion...) qui ont pu être rassemblées par ailleurs.

Compte tenu des répercussions des facteurs et conditions écologiques sur la croissance, le développement et finalement le rendement des cultures, et en comparant les différentes contraintes selon les régions, il est possible de définir pour chaque type de culture (2) et pour chaque région une classe de potentialité relative :

| | | |
|---|---|---|
| Blé : classe 1 | potentialité la plus élevée | (rendements courants de 40-45 q/ha) |
| classe 2 | par exemple, 80 à 90 p. 100 de 1 | |
| etc. | etc. | |

Il est évidemment plus difficile de préciser la signification de ces classes : donner par exemple l'équivalent en quintaux de blé de la classe 1. Ceci a été fait au mieux par l'ensemble de groupe de travail, en utilisant donc toutes les références qui étaient alors disponibles : « avis d'experts », résultats d'expérimentations, étude des exploitations de pointe...

Il faut remarquer que la valeur absolue d'une classe ne peut être affirmée une fois pour toute. Elle n'est valable que dans les conditions où les potentialités ont été définies (pas de « révolution » technique), et pour le terme fixé initialement, c'est-à-dire approximativement jusqu'à la période 1976-1980. Le classement des régions peut lui aussi ne pas être immuable : une nouvelle variété peut non seulement changer la valeur absolue des classes, mais aussi les répercussions des contraintes sur le rendement, et donc modifier les potentialités relatives des régions.

Ces remarques viennent appuyer l'intérêt de l'utilisation des résultats provenant des expérimentations réalisées dans les régions.

L'orientation générale de l'assolement qui, du point de vue écologique, serait le mieux adapté à chaque région a été ensuite précisée (tabl. 5). Une répartition de la SAU, représentant globalement l'ensemble de la région, a été esquissé en

(1) S. A. U. = Surface agricole utile.
(2) Céréales d'hiver, cultures annuelles d'été, systèmes fourragers (ensemble des fourrages possibles).

TABLEAU 5

*Quelques exemples de potentialités de production et de répartition de la S. A. U. selon les contraintes écologiques*

| Régions naturelles | Céréales d'hiver et printemps | | Cultures annuelles d'été (maïs, sorgho) | | Systèmes fourragers Fourrages pluriannuels, annuels | | Cultures spéciales | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Potentialités de production | SAU « optimum » (%) | Potentialités de production en culture sèche | SAU « optimum » (%) | Potentialités de production en culture sèche | SAU « optimum » (%) | Potentialités de production | SAU « optimum » (%) |
| Aubrac | — | — | — | — | Classe 4 | 95-100 | — | — |
| Segala | Classe 2 à 3 | 30 | Classe 3 | 15 | Classe 2 | 55 | — | — |
| Causses (combes argileuses et vallées exclues) | — | — | — | — | Classe 6 | 95-100 | | |
| Lauragais | Classe 1 | 60 | Classe 4 à 3 | 30 | Classe 3 | 10 | | |
| Terrasses alluviales anciennes | Classe 3 si assainissement et prairies temporaires | 35-40 | Classe 4 à 6 (hétérogène) | Très aléatoire, fonction de situation | Classe 4 | 55 | Classe 2 (favorable) vigne surtout | 5-10 |

tenant compte des classes précédemment définies. Les cultures qui ont la meilleure potentialité tendent à occuper la plus grande place, mais il est tenu compte des principaux impératifs agronomiques de succession des cultures. Rappelons que ceci a été fait également dans l'hypothèse où les rapports de prix sont voisins des rapports actuels.

Cette occupation de la SAU est naturellement susceptible de variation autour des pourcentages indiqués, surtout dans les régions les moins homogènes.

Signalons enfin que ces résultats recoupent certains modèles élaborés par les organismes de Gestion pour quelques régions, ce qui reflète l'importance des contraintes du milieu naturel : pour certaines régions, les résultats obtenus par programmation linéaire donnent une grande importance aux céréales d'hiver et aux cultures d'été (coteaux molassiques). Dans d'autres, au contraire, les cultures d'été apparaissent très peu (terrasses d'alluvions anciennes).

## C. — DISCUSSION

Après la présentation des données qui ont été utilisées et des résultats qui en découlent, il paraît important de discuter de la façon d'obtenir ces résultats, avec leurs limites et leurs prolongements possibles, et de voir ensuite le parti qui a été tiré de ces travaux, dans une optique de planification et d'aménagement.

### 1. — *L'obtention des résultats*

La démarche qui a été employée pour répondre au problème posé peut être schématisé de la façon suivante :

— inventaire et étude des principaux caractères des climats et des terrains ;

— examen des aptitudes culturales par région où le climat et les terrains étudiés précédemment sont suffisamment homogènes ;

— appréciation des potentialités de production des principales cultures dans chaque région et de l'occupation optimale du sol du point de vue écologique ;

— étude, par la méthode expérimentale, de certains aspects des systèmes de culture, en quelques points précis.

Il faut préciser que si des références ponctuelles sont utilisées, elles le sont dans un but de généralisation pour une région. En effet, l'une des exigences, mais aussi une des difficultés de cette étude était de parvenir à des résultats qui puissent caractériser une région prise globalement, et donc qui tiennent suffisamment compte des situations pédo-climatiques favorables et défavorables.

Le court délai imparti, l'étendue de la région intéressée (plus de 4 500 000 ha de surface totale) rendaient difficilement applicable la méthode proposée par HENIN et DEFFONTAINES (1970) fondée essentiellement sur l'enquête dans des exploitations de la zone étudiée.

D'autre part, le but de cette démarche était beaucoup plus une projection dans l'avenir qu'un examen des améliorations possibles à court et moyen terme. Les techniques culturales et le milieu socio-économique ont donc été supposés *a priori* comme non limitants et n'ont pas été étudiés. Il ne s'agissait pas là de dégager un

programme de développement ou de vulgarisation, mais de savoir ce qu'il était possible d'obtenir comme rendements physiques du seul fait des facteurs et des conditions écologiques.

Nous avons donc envisagé directement les rapports plante-milieu pour chaque région, compte tenu :

— des caractères de climat et de terrain de la région ;
— des références de rendements disponibles dans cette région, références reliées aux caractères pédo-climatiques de la station où ils ont été obtenus ;
— résultats d'expérimentation de rotations, d'irrigations, etc. ;
— résultats d'essais et de démonstrations de variétés ;
— données obtenues par enquête dans certains cas ;
— données obtenues auprès des organismes de gestion ;
— données recueillies auprès d' « experts ».

Dans ces conditions, la généralisation à chaque région des références recueillies permet d'estimer des « Potentialités de Production » et de proposer une ébauche de systèmes de culture, qui ne tient compte que des contraintes écologiques. La mise au point d'un système de culture nécessiterait naturellement une étude des techniques culturales, une étude de l'exploitation et l'élaboration de modèle en tenant compte des diverses combinaisons des facteurs de production et des différents coûts de production. La démarche globale que nous avons utilisée n'exclut pas par la suite de tels travaux.

Le schéma utilisé pour la détermination des potentialités est donc le suivant :

Milieu climat-Terrain ——→ Rendement

Des schémas plus complets (1), et donc plus complexes feraient intervenir les autres facteurs de production :

Milieu climat-Terrain ——————→
Techniques culturales ——————→ } Rendement
Environnement socio-économique ——→

Le produit : Rendement x % de S A U affecté à la culture permet de calculer un indice de « production potentielle globale », caractérisant chaque région (Langlet, Viard, 1969). Nous ne reviendrons pas sur les critiques formulées à propos d'un tel indice, la prise en compte de critères de revenus paraîtrait plus satisfaisante. Néanmoins, nous avons pu obtenir par là une indication comparative de la productivité qui peut être escomptée dans chaque région, non pas culture par culture, mais dans une optique de systèmes de cultures.

*Limites de cette approche, prolongements éventuels.*

Elles sont d'abord inhérentes aux données et aux différences utilisées:
— connaissance du climat et des terrains.

En particulier, il faut souligner l'intérêt et la nécessité d'une étude fréquentielle des principales caractéristiques climatiques, d'une carte pédologique et d'une carte des pentes si la topographie de la région est accidentée (l'échelle des cartes doit être bien adaptée à l'étendue du territoire étudié).

(1) Gras, Deffontaines *et al.*, 1970. Compte rendu de réunion du groupe analyse et synthèse sur l'aménagement du territoire (S. E. I.).

— connaissance des relations entre les facteurs écologiques (climat-terrain) et la croissance, le développement, les composantes du rendement des plantes : la définition de chaque contrainte, leur hiérarchisation en découle directement ;
— connaissance des systèmes de cultures, notion prise ici dans le sens très large de « successions possibles de cultures » ou suites de cultures (SEBILLOTTE, 1968). Cela implique, avec d'ailleurs la remarque précédente, une étude des techniques culturales pour leurs répercussions à la fois sur les cultures et sur l'organisation d'une entreprise agricole en général ;
— nombre et qualité des références utilisées pour déterminer les niveaux de potentialités et ébaucher les « systèmes de cultures ». Il est notamment indispensable qu'à chaque référence puissent être associées les conditions d'obtention et la situation pédo-climatique de la station où elle a été obtenue.

D'autres limites proviennent du schéma lui-même :
— définition des contraintes et leur hiérarchisation : il est difficile de généraliser des références à une région sans introduire une trop grande part de subjectivité, qui doit d'ailleurs se réduire au fur et à mesure que progressera la connaissance des milieux et des relations sol-plante ;
— valorisation des références utilisées : le mode de dépouillement et l'utilisation des références, compte tenu de la remarque précédente, impliquent l'emploi de méthodes mathématiques et statistiques pour réduire la part de subjectivité, mais aussi pour tirer pleinement parti de ces références ;
— nécessité, pour que ces travaux débouchent efficacement sur des perspectives d'évolution de systèmes de cultures, de prolongements vers :
  — des études techniques et économiques sur les rotations : études des effets résiduels à court et à long terme des cultures, étude des moyens techniques nécessaires, résultats économiques ;
  — des travaux sur l'entreprise agricole : replacer les rotations dans le cadre de l'entreprise, compte tenu des contraintes de travail, de main-d'œuvre, de capitaux.

C'est donc une véritable synthèse entre plusieurs équipes de recherche qui nous paraît devoir être faite, et des contacts dans ces directions existent déjà. Il faut remarquer d'ailleurs que les résultats que nous avons présentés constituent déjà en eux-mêmes une synthèse, au moins partielle, de travaux réalisés au cours d'années antérieures par des équipes différentes.

De la même façon, tous les travaux d'expérimentations faits par les différents services de Vulgarisation et de Développement de la Région Midi-Pyrénées doivent aider à aller plus avant dans cette « prospective ».

En effet, une action de coordination débute actuellement, qui doit permettre de rassembler les rendements, certaines de leurs composantes, les principales techniques culturales utilisées (variétés, fumures, séquences de travaux...) ainsi que le maximum de renseignements sur les conditions pédo-climatiques de ces expérimentations. Les résultats doivent être regroupés selon les régions que nous avons délimitées et publiés en une brochure unique.

Des « champs de références pluriannuels » doivent également être implantés. Leur but est de recueillir toutes ces données dans le cadre de rotations normalement pratiquées dans une exploitation. Il paraît en effet important que ces études soient menées dans le contexte des systèmes de culture, et à cet égard, ces « champs » doivent

pouvoir y contribuer : il est impossible d'installer dans toutes les petites régions des dispositifs d'études détaillées des rotations et d'autre part dans les essais et démonstrations n'interviennent pas toutes les contraintes d'un système de culture normalement pratiqué.

Une analyse économique peut également se concevoir en liaison avec les Organismes de Gestion, par exemple une étude des marges brutes. La comparaison des régions entre elles serait certainement alors plus satisfaisantes que lors de l'emploi des « indices de production potentielle globale », où aucune idée de coût ou de revenu n'intervient. En effet, si deux régions A et B ont en théorie une même potentialité pour une culture, les coûts de production (fumure, travail) pour un même rendement sont peut être plus élevés en A qu'en B. Outre le fait que l'on prend mieux en compte les problèmes de gamme de production de variations des coûts et des prix, l'analyse économique nous paraît indispensable à une recherche sur les systèmes de culture et de production, ce qui nécessite donc une collaboration interdisciplinaire.

### 2. — *L'utilisation des résultats*

Compte tenu des limites que nous venons de souligner, examinons ce que ces résultats ont permis d'obtenir.

Ces travaux ont été menés dans le cadre d'un groupe de travail régional et devaient être utilisés par ce groupe, en vue d'une synthèse pour tenter une prévision de la nature et du volume des productions susceptibles d'être mises en marché en 1975-1980, pour l'ensemble de la région administrative Midi-Pyrénées.

Les autres thèmes de ce groupe étaient les suivants :

— perspectives d'évolution des structures des exploitations,
— perspectives de l'offre des divers produits : évaluation de l'offre potentielle,
— équipements de commercialisation (états actuels, développements nécessaires).

Nous devions étudier les potentialités physiques et les prévisions d'occupation de la S A U précisées pour les diverses zones de la région. Ces données ont été utilisées ensuite dans les autres sous-groupes qui ont construit des systèmes-types des production (1). Ce ne sont bien sûr que des systèmes théoriques et potentiels : ils sont construits à l'échelle d'une région et il n'est pas certain que toutes les structures permettent l'expression des potentialités physiques et que les exploitants recherchent ce but. Ces systèmes ont été cependant agrégés les uns aux autres pour l'ensemble des zones et ont permis d'évaluer le volume de l'offre potentielle des principaux produits agricoles.

Une certaine modulation de ces volumes est d'ailleurs possible : on peut faire diverses hypothèses selon que l'on considère l'expression des potentialités possibles à 100 p. 100, ou seulement à 80 p. 100, à 60 p. 100..., selon les régions ou les cultures. On peut aussi envisager des rapports de prix très différents des rapports actuels.

Dans certaines petites régions, où les travaux des organismes de gestion étaient plus avancés, de tels paramétrages (tenant compte également des modifications éventuelles des rendements dans le sens d'une plus grande précision locale) ont été

(1) Nous renvoyons aux études publiées par la Mission économique régionale en 1969 pour la préparation du VI[e] Plan.

réalisés par programmation linéaire. Ces résultats locaux ont été précieux pour servir de « bornes » aux résultats plus globaux obtenus dans des régions moins connues.

Les accroissements prévisibles de production ont été calculés pour la région, en remarquant bien qu'il s'agit là de maxima car :

— les potentialités de chaque zone ne seront peut-être pas atteintes (« inerties » de l'appareil de production) ;

— il y a des substitutions possibles entre les diverses cultures :

blé tendre ——→ blé dur
maïs ——→ sorgho
céréales secondaires
etc...

Malgré tout, ces calculs permettent de localiser grossièrement, selon les régions, les investissements nécessaires (stockage, conditionnement, commercialisation...) et d'en exprimer approximativement le montant.

Les chiffres obtenus, et notamment ceux concernant les productions fourragères, ont également été utilisées dans les « plans de relance » des diverses productions animales. En effet, la connaissance du niveau des productions fourragères, des différentes contraintes écologiques (notamment les températures, l'alimentation en eau, la topographie) permettent de distinguer les régions selon le degré d'intensification possible de ces productions. Les équipements à prévoir, les techniques à mettre en œuvre en dépendent (1).

Le zonage des régions selon la nature et l'intensité des contraintes (en particulier celles liées à l'alimentation en eau des plantes et au comportement physique des sols), les résultats obtenus sur les relations déficit hydrique-rendements et marges brutes et sur les rotations, permettent de formuler des avis motivés sur l'aménagement hydraulique de certaines régions. Ces résultats montrent en effet la nécessité de travaux d'assainissement plus ou moins généralisés selon les terrains ou les cultures (MARTY, COURAU Marielle, 1969), et les précautions à prendre pour les aménagements collectifs d'irrigation.

Certains terrains peuvent porter des cultures intensives, où l'irrigation sera correctement valorisée. Sur d'autres, au contraire, il vaut mieux prévoir des systèmes de cultures moins intensifs, où l'irrigation, bien que nécessaire, devra être conduite de façon très prudente en tenant compte à la fois de ses répercussions sur l'état physique du sol et de sa valorisation beaucoup plus difficile (MARTY, MAERTENS, 1966).

En tenant compte de ces bases écologiques, il est alors possible d'éclairer la définition des priorités quant aux zones à aménager : par exemple, il vaut peut-être mieux équiper pour l'irrigation des périmètres choisis dans les zones où la grande culture intensive est possible et valorisera facilement l'eau, et par contre, réaliser dans la zone la moins favorable des travaux d'assainissement mêmes légers qui, outre le fait qu'ils constituent un préalable à des équipements d'irrigation, amèneraient de toutes façons une amélioration sensible des revenus de la population agricole de la zone.

(1) Les contraintes de structures d'exploitation et les problèmes économiques ont été étudiés ailleurs.

## CONCLUSIONS

La démarche utilisée découle directement de la nature même des objectifs qui avaient été assignés : obtention rapide de données caractérisant des rendements potentiels accessibles à la majorité des agriculteurs d'une région, en supposant un niveau technique optimum et un environnement socio-économique convenable.

Ces résultats ne pouvaient être que globaux, puisqu'ils sont obtenus à l'échelle des régions et cherchent à intégrer l'ensemble de leurs situations, bonnes ou mauvaises.

Cette démarche a des inconvénients et des limites que nous avons soulignés. Cependant, elle nous a permis de répondre en temps voulu au problème qui avait été posé, en utilisant des critères aussi objectifs que possible. Les organismes professionnels et administratifs, responsables de la préparation régionale du VI[e] Plan, ont pu ainsi disposer de travaux leur donnant des références caractérisant une petite région, permettant une certaine comparaison des petites réactions entre elles (qualitativement et quantitativement : par la nature de la couverture végétale, et par le volume des productions), et pouvant orienter les travaux d'autres groupes de travail (équipements, aménagements...). Auparavant, les références étaient plus fragmentaires et plus localisées : on connaissait les capacités de production de quelques cultures dans certaines situations, et on ne pouvait comparer les régions que par rapport au comportement d'une ou deux cultures. Les résultats que nous avons obtenus constituent donc une étape appréciable dans la connaissance scientifique de la région.

Nous avons indiqué pourquoi une enquête détaillée, précise, mais intéressant alors un territoire plus restreint ne pouvait convenir à ce type de travail. Néanmoins certains points dans notre démarche relèvent de techniques analogues :

— réinventaire des caractères des climats et des sols,

— recueil de références de rendements dans les expérimentations des démonstrations..., et auprès d'experts.

Dans l'avenir, les techniques d'enquête pourront certainement contribuer à améliorer, à préciser nos résultats et même à aller plus avant vers les prolongements que nous avons évoqués. La coordination de l'expérimentation régionale va dans ce sens : lorsqu'elle sera vraiment effective et lorsqu'elle aura atteint suffisamment d'ampleur, une exploitation statistique des données recueillies sera possible et permettra de connaître avec plus d'objectivité les potentialités des régions, les systèmes de culture et d'aborder leurs liaisons avec les techniques culturales.

Une collaboration entre plusieurs équipes de recherche, ainsi qu'une collaboration interdisciplinaire nous paraissent nécessaires pour aborder de façon plus complète le problème des potentialités régionales. Nous n'en avons abordé là qu'un aspect, et il nous était d'ailleurs impossible de tout étudier, la question étant trop vaste.

Il y intervient à la fois des problèmes d'objectifs, c'est-à-dire de destination des résultats (références, programme de développement...), de méthode (« enquête bibliographique », enquête sur le terrain, nature des objets ou sujets enquêtés..., dépouillement et exploitation statistique), de synthèse interdisciplinaire (transformation des produits, productions nouvelles, études économiques...).

Mais l'étude des potentialités suppose également des recherches approfondies sur des thèmes tels que croissance et développement, alimentation hydrique et minérale, travail du sol..., ainsi que des travaux sur l'entreprise agricole.

Ces thèmes peuvent apporter des réponses aux observations faites sur les relations :

Milieu physique ——————→
Techniques culturales ——————→ } Rendement
Milieu socio-économique ——————→

Inversement, l'étude des potentialités régionales ne peut manquer de poser d'autres questions aux équipes de recherche travaillant sur ces thèmes.

Nous participons à une confrontation entre des travaux reliant différents aspects provenant d'études sur les facteurs et les conditions écologiques — croissance et développement — productivité, d'études expérimentales sur les rotations, d'études sur la gestion technique des exploitations. Cette collaboration entre équipes différentes, qui actuellement ne fait que s'amorcer, doit contribuer à la réalisation de synthèses partielles en rapport à l'ensemble du problème des potentialités, et à préparer donc par là une synthèse interdisciplinaire.

Ces travaux, les données qui en découleront, sont importants pour les agriculteurs. En effet, ils nécessitent des études sur les milieux, les relations sol-plantes et les techniques culturales dont la meilleure connaissance ne peut qu'augmenter la productivité des exploitations, et de plus ils peuvent constituer une base sur laquelle les agriculteurs et leurs organismes professionnels pourront s'appuyer pour prévoir et guider l'évolution de leur secteur d'activité.

*Reçu pour publication en mars 1971.*

## REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier ici tous les membres des Ateliers régionaux de Préparation du VI^e^ Plan (Organisations professionnelles agricoles, Administration et Mission économique régionale, Université) pour l'aide qu'ils nous ont apportée. De plus, ce travail n'aurait pas été possible sans les études, les critiques et les conseils des chercheurs de la Station d'Agronomie, et tout spécialement de M. BLANCHET.

## SUMMARY

### AN ATTEMPT TO FORECAST THE ORIENTATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN VARIOUS REGIONS ON THE BASIS OF ECOLOGICAL FACTORS

In order to achieve an overall regional forecast for 1980 of the nature and volume of agricultural production on the basis of ecological factors alone, consideration has been given to a grading of their effect on crops.

This undertaking necessitated the following steps :

— inventory and study of the main characteristics of climate and land,

— examination of cultural aptitudes in each region where the climate and land are sufficiently homogeneous,

— estimation of production potential of principal crops in each region and of the optimum soil utilization from an ecological point of view,

— study at certain selected points of various aspects of crop farming systems (water-supply for summer crops, physical behaviour of certain alluvial tracts).

This undertaking thus involved a direct study of the following relationships :

Plant Environment : Environment climate land → yield.

The influence of farming techniques and the socio-economic environment are not dealt with here.

A vast number of references were collected, in addition to data concerning climate, land, test results and demonstrations, research results in certain cases, data obtained by farm management organizations and data obtained from experts.

For each regions, production potential for each crop and optimum soil utilization within ecological limitations have been evaluated. The method employed and the utility of the results obtained are presented and discussed.

## ZUSAMMENFASUNG

### VORAUSSAGEVERSUCHE ZUR ORIENTIERUNG DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN ERZEUGUNG IN VERSCHIEDENEN AGRARGEBIETEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN ÖKOLOGISCHEN FAKTOREN

Um zu versuchen, in Abhängigkeit der blossen ökologischen Faktoren und jeweils für ein Agrargebiet, die Natur und den Umfang des Gesamtbetrages der zu erwartenden landwirtschaftlichen Erzeugung für das Jahr 1980 vorauszusehen, wurde eine Einteilung dieser Faktoren nach Rangordnungen hinsichtlich ihrer Einwirkung auf die Kulturen vorgenommen.

Diese Versuche erstrekten sich auf folgende Gebiete :

— Inventar und Untersuchung der hauptsächlichsten Merkmale der Witterungsverhältnisse und der Böden ;

— Prüfung der Anbaufähigkeit in den einzelnen Gebieten, wo das Klima und die Böden genügend homogen sind ;

— Schätzung der Erzeugungspotentialitäten der hauptsächlichsten Kulturen in jedem Gebiet und der optimalen Besetzung des Bodens in ökologischer Hinsicht ;

— Untersuchung, in einigen bestimmten Gebieten, von bestimmten Aussichten der Bodennutzungssysteme (besondeders was die Wasserversorgung der Sommerkulturen und das physikalische Verhalten bestimmter alluvialer Böden betrifft.)

Mit der Durchführung dieser Bestimmungsversuche der Potentialitäten wurden also die Beziehungen Pflanze-Milieu : Milieu Klima Boden → Ernteergebnis, untersucht. Die Beziehungen zu den Anbaumethoden und zu der sozialökonomischen Umwelt werden hier nicht behandelt.

Ausser den Ergebnissen, die sich auf das Klima und die Böden beziehen, werden verschiedene Referenzen festgestellt : Ergebnisse von Versuchen und Vorführungen, gelegentliche Umfrage ergebnisse, Erkundigungen bei Verwaltungsstellen oder bei Sachverständigen.

Für jedes Gebiet konnte eine Erzeugungspotentialität für jeden Kulturtypus und eine « optimale » Besetzung des Bodens, je nach den ökologischen Beanspruchungen angegeben werden. Die verwendete Methode und die Auslegung der Ergebnisse werden erklärt und diskutiert.

## РЕЗЮМЕ

### Опыт прогноза ориентации сельскохозяйственной продукции различных природных районов, в зависимости от экологических факторов.

А. ЛАНГЛЭ.

Чтобы попытаться предвидеть глобально по районам на 1980-й год природу и об'ем сельскохозяйственной продукции, в зависимости только

от экологических факторов, была намечена иерархизация действия этих факторов на различные культуры; в исследование это входили следующие этапы :

— Инвентаризация и изучение главных характерностей климатов и почв;

— Изучение склонностей культур по районам с достаточно однородными климатом и почвами;

— Оценка потенциальностей продукции главных культур каждого района и оптимальной оккупации почв в экологическом смысле слова;

— Изучение, в некоторых определенных пунктах, некоторых аспектов систем культур (это относится, в частности, к водному питанию культур летом и физическому поведению некоторых аллювиальных почв);

Эта система определения потенциальностей позволила провести прямое изучение отношений Растение-Среда : Среда-Климат-Почва-Урожайность. Зависимость от технических приемов культуры и от социо-экономического окружения, не рассматривалась.

Кроме данных о климате и о почве собраны были самые разнообразные данные : результаты опытов и демонстраций, результаты анкет в определенных случаях, данные собранные органами управления, данные экспертиз.

Получена была таким образом возможность указать по районам : потенциональность продукции по типу культуры, и оптимальную оккупацию почв в зависимости от экологических принуждений. В статье раз'ясняются, кроме того, применявшиеся методы и полученные результаты, и обсуждаются практические применения полученных результатов.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Blanchet R., Bosc M., Maertens C., Gelfi N., Cabelguenne M., 1966. *Quelques caractères physico-chimiques de sols types de la région toulousaine ; conséquences agronomiques.* Brochure Station d'Agronomie de Toulouse, 23 p.

Brunet R., 1965. *Les Campagnes toulousaines.* Thèse, Faculté des Lettres et des Sciences humaines de Toulouse, série B, t. 1, 727 p.

Combret M., Blanchet R., Fioramonti S., 1969. Influence de diverses modalités d'irrigation sur l'intérêt économique de la culture du maïs dans des sols possédant des réserves hydriques d'importance variable. *C. R. Acad. agric.*, **55**, 77-84.

Drouineau G., 1963. Recherche agronomique et mise en valeur. *Bull. Techn. Inform.*, 185, 705-709.

Garnier M., 1967. Climatologie de la France. *Mémorial de la Météorologie uationale* n° 50.

Gignoux F., Cavalan P., 1970. Quelques réflexions sur les relations Eau-Maïs. *Coteaux de Gascogne*, octobre 1970.

Hénin S., 1953. Pédologie et Fertilisation. *Bull. Techn. Inform.*, 81, 463-468.

Hénin S., Feodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960. *Le profil cultural, Principes de physique du sol*, S. I. E. A., Paris.

Hénin S., Deffontaines J. P., 1970. Principes et utilité de l'étude des potentialités agricoles régionales. *C. R. Acad. Agric.*, **56**, 463-472.

Langlet A., Blanchet R., Fioramonti S., 1969. Essai d'appréciation des potentialités de production des principaux milieux naturels de la Région Midi-Pyrénées. I. Méthodes d'études. *C. R. Acad. Agric.*, **55**, 714-722.

LANGLET A., VIARD R., 1969. Essai d'appréciation des potentialités de production des principaux milieux naturels de la Région Midi-Pyrénées. II. L'utilisation des références disponibles. *C. R. Acad. Agric.*, **55**, 723-729.

LECARPENTIER C., BESANVAL G., DARVES BORNOZ R., 1964. *Étude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation du Bassin Aquitain.* Ministère de l'Agriculture, Section technique centrale de l'Aménagement des Eaux, 64 p.

MAERTENS C., FIORAMONTI S., COURAU M., PUECH J., 1966. Modalités d'utilisation de l'eau du sol par le maïs, examen de la notion de réserve utilisable. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1338-1348.

MARTY J.-R., MAERTENS C., 1966. Répercussion du tassement excessif d'un sol mal structuré sur la croissance et la production d'une culture irriguée le maïs. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1348-1356.

MARTY J.-R., 1969. *Contribution à l'étude des boulbènes.* Thèse, Faculté des Sciences, Paris.

MARTY J.-R., COURAU M., 1969. Influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans un sol mal structuré. *Ann. agron.*, **20** (4), 361-369.

MARTY J.-R., FIORAMONTI S., 1970. Comparaison de diverses rotations sur sol limoneux mal structuré. Effet améliorant des cultures fourragères. *Ann. agron.*, **21** (3), 269-286.

PUECH J., 1966. Appréciation de l'évapotranspiration potentielle dans une région soumise à l'effet du vent. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, **12**, 328-335.

PUECH J., 1969. Étude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption. *Ann. agron.*, **20** (3), 245-261.

REY P., 1957. *Écologie générale des Coteaux de Gascogne*, Service de la Carte Phytogéographique, C. N. R. S., 40 p. Cartes de la Végétation de la France.

SÉBILLOTE M., 1978. Les rotations culturales, approche méthodologique d'une politique dynamique. *Journées F. N. C. E. T. A.* 1968, étude n° 1371.

***, 1968. *Plante, sol, climat et irrigation.* Études réalisées en 1965, 1966, 1967 par la Station d'Agronomie de Toulouse, 180 p.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (4), 451-476.

# INFLUENCE DES CONSTITUANTS DU SOL SUR SON HUMIDITÉ A PF 3

P.-L. OSTY

*Service d'Expérimentation et d'Information,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

Il existe de nombreuses expressions de l'humidité du sol à pF 3 en fonction de la granulométrie, sous la forme de combinaisons linéaires des taux de fractions granulométriques. Pour essayer d'évaluer le choix des fractions et du modèle mathématique, on a soumis au même traitement statistique deux groupes d'échantillons très différents.

On étudie d'une part des échantillons de terres provenant de formations triasiques de Lorraine et d'autre part des échantillons artificiels dûs à KHEYRABI et MONNIER (1968). Ces derniers sont constitués, à partir de matériaux identiques, soit d'argile et d'une autre fraction granulométrique (mélanges binaires), soit d'argile à 4 niveaux préférentiels (5, 15, 25 et 35 p. 100) et d'autres fractions entre lesquelles on opère des substitutions (mélanges complexes). L'ajustement de l'humidité à pF 3 à la granulométrie, suivant un modèle additif, est obtenu par le calcul de régression.

Le contrôle de l'ajustement, au moyen de l'analyse progressive de variance, ne juge que la qualité de la description globale, car il est notamment tributaire de la constitution de l'ensemble traité (liaisons éventuelles des variables contrôlées, incidence de variations incontrôlées). Les mélanges artificiels, qui offrent plus de garanties de ce point de vue, permettent de montrer que le rôle de toutes les fractions granulométriques peut être considéré comme additif :

— dans le cas des mélanges binaires aux taux d'argile inférieurs à 70 p. 100 ;

— dans le cas des mélanges complexes, le taux d'argile étant fixé.

Par contre, il n'y a pas d'addivité — ce qu'on peut appeler l'effet texture — si les substitutions entre fractions concernent aussi l'argile, dont le rôle particulier est ainsi souligné.

L'ensemble des mélanges complexes se prête à une bonne prévision de l'humidité à pF 3 à partir de la granulométrie ; le coefficient de détermination est de 0,95 pour l'équation :

$$\text{Humidité à pF 3} = 0{,}494\ \text{argile} + 0{,}218\ \text{limon fin} + 0{,}079\ (\text{limon grossier} + \text{sable fin}) + 0{,}008\ \text{sable grossier}$$

(toutes les données en p. 100 du poids).

Avec une précision moindre, car des variations de nature et de forme notamment peuvent intervenir, la prévision est possible aussi pour les terres de Lorraine à partir des taux d'argile et de matière organique : le coefficient de détermination est alors de 0,73.

Mais, comme le montre notamment l'étude de sous-ensembles constitués sur la base de catégories vernaculaires, cette prévision peut être en défaut si la définition dimensionnelle des constituants recouvre en fait de fortes variations de propriétés physico-chimiques. On a ainsi mis en relief le rôle de la capacité d'échange totale qui, pour l'ensemble des terres étudiées, est la meilleure variable explicative de l'humidité à pF 3 (coefficient de détermination : 0,89).

## INTRODUCTION

La caractérisation des propriétés physiques du sol est abordée classiquement par la granulométrie. L'effet texture est lié plus ou moins aux possibilités d'arrangement des particules classées par dimension. Seules les propriétés du système permettent de justifier la manière dont on associe les fractions isolées au cours de l'analyse granulométrique.

De nombreux auteurs ont cherché des relations mathématiques entre la granulométrie et des propriétés physiques exprimées sous forme quantitative. Ces relations ont pour but de suggérer une explication de ces propriétés ou au moins de les prévoir, en évitant ainsi des déterminations analytiques. C'est notamment le cas de la rétention d'eau.

Il s'agit ici de la rétention d'eau dans des conditions conventionnelles, l'humidité à pF 3, que l'on peut utiliser aussi pour une caractérisation globale de la texture (GRAS, 196?). De nombreuses formules ont été proposées pour calculer l'humidité à pF 3 à partir du taux d'une ou plusieurs fractions granulométriques.

Les différences importantes qui existent entre ces formules sont attribuées à la diversité des distributions granulométriques, et aux particularités de forme ou de nature des constituants. Ce sont des facteurs dont le taux d'une ou plusieurs fractions ne rend pas compte. On peut ainsi se demander si les modèles mathématiques utilisés ne sont pas à mettre en cause.

Pour tenter d'évaluer l'incidence du choix de telle ou telle fraction pour rendre compte de l'humidité à pF 3 à partir de la composition granulométrique, on a soumis au même traitement statistique les données concernant deux groupes d'échantillons très différents,

— des échantillons naturels, provenant de sols sur formations triasiques ;

— des échantillons artificiels, constitués à partir de matériaux identiques, qui présentent de ce fait l'avantage de ne comporter que des variations quantitatives, la nature et la forme des constituants étant invariantes.

## MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODES D'ÉTUDE

### 1. — *Matériel expérimental*

#### 1. 1. *Les échantillons artificiels.*

Ces échantillons artificiels proviennent d'un travail antérieur de KHEYRABI et MONNIER (1968) concernant l'influence de la granulométrie sur la stabilité structurale ; on rappelle ici succinctement leurs caractéristiques.

Pour isoler le rôle de la distribution dimensionnelle des constituants élémentaires, les échantillons sont constitués de mélanges en proportions variables de particules appartenant aux différentes classes granulométriques de l'échelle d'ATTERBERG modifiée. Les constituants élémentaires sont présentés dans le tableau 1.

Deux types de mélange ont été réalisés :

TABLEAU I

*Caractéristiques des constituants des mélanges artificiels*

| Désignation | Sigle | Taille (μ) | Provenance |
|---|---|---|---|
| Argile | *a* | 0-2 | Limon de Versailles (horizon B) |
| Limon fin | *l* | 2-20 | — *id.* — |
| Limon grossier | L | 20-50 | — *id.* — |
| Sable fin | *s* | 63-160 | Sable de Fontainebleau |
| Sable grossier | S | 280-1 500 | — *id.* — |

1° Des *mélanges dits binaires*, constitués par des doses croissantes d'argile (de 10 en 10 p. 100) associée à chacune des autres fractions :

— limon fin : série (incomplète) des mélanges *al*
— limon grossier : série des mélanges *a*L
— sable fin : série des mélanges *as*
— sable grossier : série des mélanges *a*S.

2° Des *mélanges dits complexes*, constitués par une quantité variable d'argile associée à deux, et parfois trois, des fractions complémentaires limon fin (*l*), limon grossier et sable fin regroupés (L + *s*), et sable grossier (S).

Parmi les 52 échantillons disponibles, on peut isoler quatre séries principales définies par leur taux d'argile, soit 5, 15, 25 et 35 p. 100 d'argile respectivement. Leur composition est donnée par les diagrammes de la figure 1. Quelques échantillons complémentaires comportent 7, 20, 50 ou 65 p. 100 d'argile.

1. 2. *Les échantillons naturels.*

Les prélèvements ont été faits en Lorraine, dans le sud de la Meurthe-et-Moselle.

Parmi les 65 échantillons de terre, un bon nombre proviennent de sols dérivant de marnes ou calcaires du Keuper (sols bruns calcaires ou calciques), ce qui explique leur texture lourde. De plus, comme il est fréquent dans cette région (Levy, 1968), certaines formations superficielles sont marquées par la présence de limons (sols bruns lessivés, souvent hydromorphes). Ainsi que le montre la figure 2, ces terres présentent des granulométries variées.

Parmi ces échantillons, on a, de plus, constitué deux sous-groupes sur la base de deux catégories vernaculaires bien représentées dans la région.

— 16 échantillons de « grosses terres » de texture très lourde, situés sur des marnes du Keuper inférieur.

— 16 échantillons de « terres blanches » marquées par la présence, au moins dans l'horizon superficiel, d'éléments limoneux en quantité notable.

Les échantillons qui ont été ainsi regroupés en catégories vernaculaires sont signalés à la figure 2.

## 2. — *Méthodes d'étude*

2. 1. *Les traitements analytiques.*

La granulométrie des échantillons artificiels est connue, puisqu'elle est à la base de leur constitution.

Les échantillons naturels ont été analysés au laboratoire d'analyses d'Arras selon les méthodes habituelles du département d'Agronomie ; on dispose ainsi de la granulométrie, ainsi que du taux de matière organique et de la capacité d'échange totale.

L'humidité à pF 3 est obtenue par la technique classique du ressuyage sous pression où la terre est disposée dans des anneaux sur une plaque de porcelaine poreuse. Pour les échantillons artificiels, le nombre de répétitions varie de 1 à 4 suivant la quantité d'échantillon disponible ;

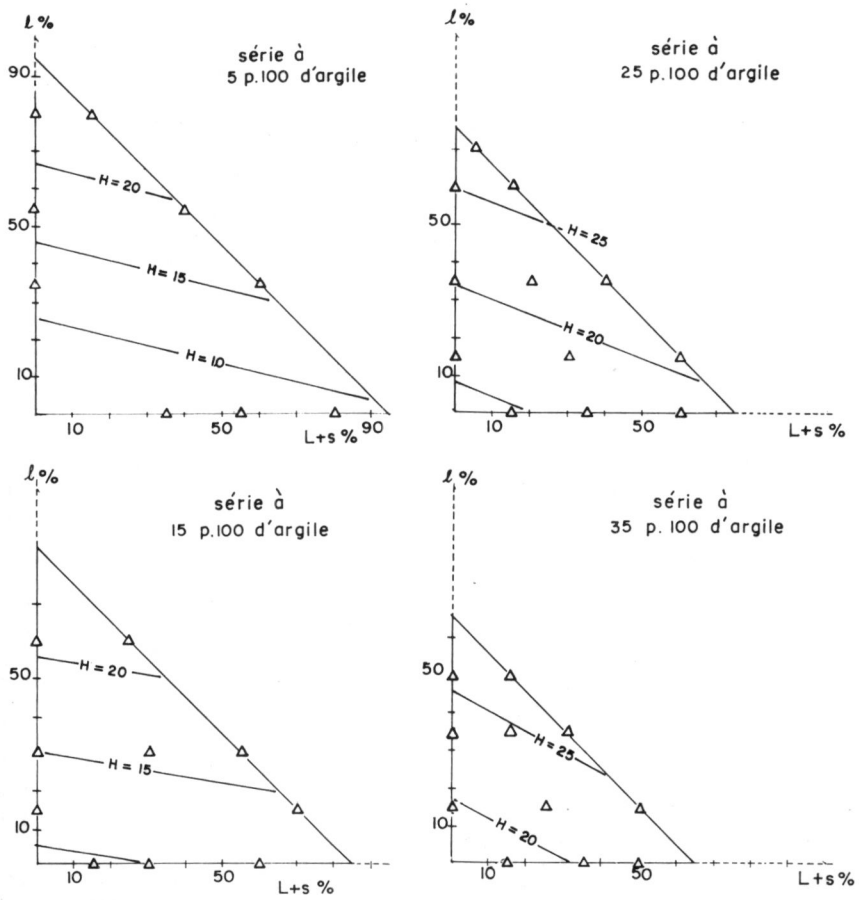



FIG. 1. — *Diagrammes des granulométries des mélanges complexes classés selon leur taux d'argile*
$l$ : limon fin ; L + $s$ : limon grossier + sable fin ; S : sable grossier
— H = $n$ — : droite d'ajustement de H = $n$ p. 100, en fonction de la granulométrie

dans l'ensemble, ce nombre est voisin de 3. Les échantillons naturels ont fait l'objet, systématiquement, de deux déterminations dont on a pris la moyenne.

2. 2. *Les traitements statistiques.*

L'ajustement de l'humidité à pF 3 en fonction de la granulométrie est effectué à partir d'une hypothèse d'additivité que l'on peut formuler ainsi :

$$H = \Sigma\, h_i\, x_i \qquad (1)$$

où : H est l'humidité à pF 3, variable à expliquer
$x_i$ est une variable explicative
$h_i$ est le coefficient d'activité de la variable $x_i$ : $\partial H/\partial x_i = h_i$ = constante.
Ce qui implique que la variation d'une variable explicative modifie la variable à expliquer proportionnellement à un coefficient constant et n'affecte ni les autres variables ni leur coefficient d'activité respectif.
Or les taux des fractions granulométriques ne sont pas indépendants car :

$$\Sigma x_i = k \qquad (2)$$

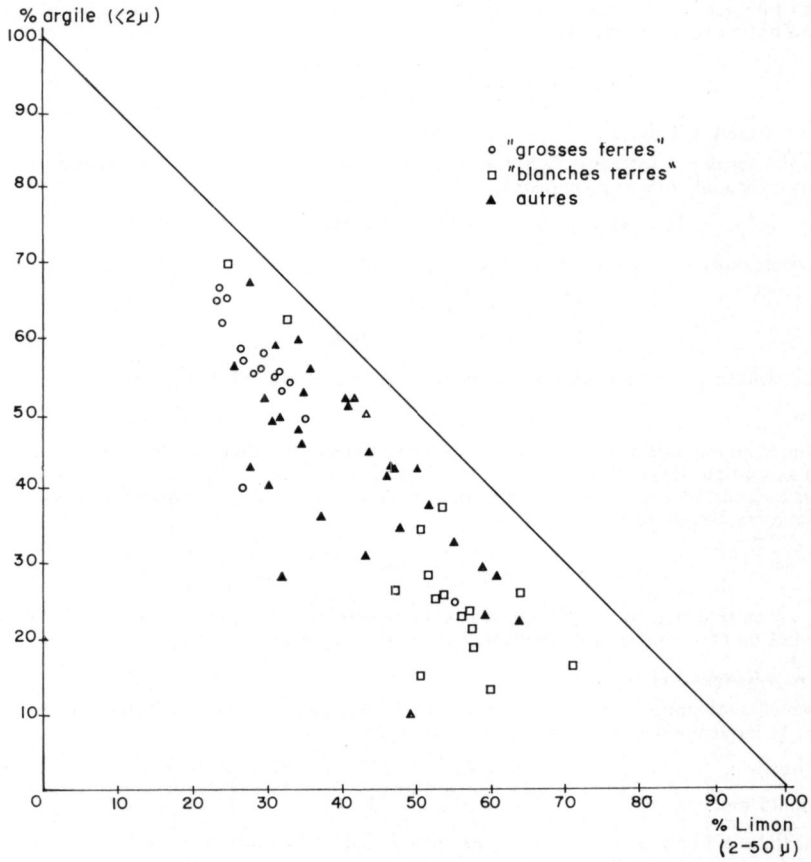



FIG. 2. — *Diagramme des granulométries simplifiées des terres de Lorraine*

si, par exemple, les $x_i$ représentent toutes les fractions granulométriques exprimées en pourcentage, $k = 100$. Les variables explicatives proposées sont donc les taux des fractions granulométriques, moins un que la relation (2) permet d'éliminer. Il est évident que la constitution de mélanges simplifiés facilite les calculs et l'interprétation des résultats.

De plus, on sait que dans les formations naturelles existent des courbes de distribution granulométrique plus ou moins typiques, ce qui traduit le fait qu'il existe des liaisons complexes entre certaines fractions. De ce point de vue, les échantillons artificiels sont plus conformes que les échantillons naturels à l'hypothèse de base.

L'ajustement proposé est réalisé au moyen d'un calcul de régression et l'analyse de variance permet d'en contrôler la signification. Les liaisons éventuelles entre les variables sont sources de difficultés (DEFFONTAINES, GRAS, 1968) : l'ajustement tient compte de ces liaisons, mais ne permet pas de les faire apparaître et on ne peut pas tester une variable indépendamment des autres. Ainsi, la première variable introduite prend en compte la variation due à son effet propre, mais aussi la variation due à des liaisons avec les suivantes. Les résultats sont donc contingents de l'ordre d'introduction des variables.

Pour rendre autant que possible comparables les résultats des régressions, on a fixé ainsi la procédure de calcul :

— rangement des variables dans l'ordre d'explications décroissantes,
— analyse progressive de la variance, les variables étant introduites dans cet ordre.

Lorsque l'ordre de sélection des variables n'est pas fonction de la taille des particules, alors que logiquement les plus fines sont les plus actives, on peut aussi imposer l'ordre d'introduction des variables.

Dans tous les cas, la qualité de l'ajustement obtenu est contrôlée au moyen du coefficient de détermination (DAGNELIE, 1970) :

$$\text{c. d.} = \frac{1 - \text{variance résiduelle}}{\text{variance totale}}$$

2. 2. 1. *Les mélanges binaires.*

L'argile (taux : $a$) est associée à une fraction complémentaire (taux : $x$). L'humidité à pF 3 s'écrit avec les conventions précédentes :

$$H = h_a\, a + h_x\, x \qquad \text{[sous la condition : } a + x = 100.\text{]} \tag{3}$$

On peut exprimer $x$ en fonction de $a$, ce qui donne :

$$H = h_a\, a + h_x\, (100 - a)$$

$$H = (h_a - h_x)\, a + 100\, h_x \tag{4}$$

Cette équation unique peut alors faire l'objet d'un ajustement de la forme :

$$H = b_1\, a + b_o \tag{5}$$

On note que du fait de la relation (2) entre les taux des fractions, les coefficients de régression obtenus ne sont pas les coefficients d'activité du modèle additif (3).

Mais à partir des coefficients de régression $b_o$ et $b_1$, on obtient immédiatement une estimation des coefficients d'activité :

$$h_x = \frac{b_o}{100} \qquad h_a = b_1 + \frac{b_o}{100}$$

On a ensuite introduit, en plus de $a$, la composante quadratique $a^2$ dont le seuil de signification permet un contrôle de la linéarité de la première régression.

2.2.2. *Les mélanges complexes.*

Les mélanges complexes ont été étudiés ensemble, chacun étant caractérisé par une granulométrie et la moyenne des humidités à pF 3 observées.

Par hypothèse : $$H = h_a\, a + h_l\, l + h_{L+s}\, (L + s) + h_S\, S \tag{6}$$

sous la condition : $$a + l + (L + s) + S = 100$$

On peut éliminer une des variables soit *par exemple* S dans l'équation générale (6), et on obtient :

$$H = (h_a - h_S)\, a + (h_l - h_S)\, l + (h_{L+s} - h_S)\, (L + s) + 100\, h_S$$

équation que l'on peut tester en calculant l'ajustement :

$$H = b_1\, a + b_2\, l + b_3\, (L + s) + b_o \tag{7}$$

Si le calcul de régression donne comme variables significatives $a$, $l$ et $(L + s)$ on obtient immédiatement les coefficients d'activité :

$$h_S = \frac{b_o}{100},\ h_a = b_1 + \frac{b_o}{100},\ h_l = b_2 + \frac{b_o}{100} \text{ et } \qquad h_{L+s} = b_3 + \frac{b_o}{100}$$

En pratique, on introduit toutes les variables dans le calcul et on observe celles qui apparaissent significatives. Si la régression élimine plus d'une variable, l'interprétation doit alors se nuancer d'hypothèses supplémentaires, comme il apparaît dans le cas des terres naturelles.

Les 4 séries de mélanges complexes définies par leur taux d'argile ont été prévues pour contrôler l'effet des substitutions entre les fractions complémentaires, le taux d'argile étant fixé. Le calcul et l'interprétation présentent donc des modalités un peu particulières.

Par hypothèse, pour chaque série :

$$H = h_l\, l + h_{L+s}\, (L + s) + h_S\, S + h_a\, a \tag{8}$$

avec : $a$ = constante

$$l + (L + s) + S = 100 - a$$

Si on élimine *par exemple* S, il vient :

$$H = (h_l - h_S)\, l + (h_{L+s} - h_S)\, (L + s) + h_a\, a + h_S\, (100 - a)$$

dont on peut estimer les coefficients par un ajustement de la forme :

$$H = b_1 l + b_2 (L + s) + b_o \qquad (9)$$

$$\text{qui permet d'obtenir : } \begin{cases} b_1 = h_l - h_S \\ b_2 = h_{L+s} - h_S \\ b_o = h_a a + h_S (100 - a) \end{cases}$$

Les coefficients d'activité $h_i$ inconnus sont au nombre de 4 ; il y a donc indétermination puisqu'il n'y a que 3 équations. Mais pour contrôler si, quel que soit le taux d'argile, les substitutions entre fractions complémentaires ont un effet constant, il suffit de comparer les couples ($b_1$, $b_2$) obtenus dans chaque série. Ce qui revient à examiner si les 4 plans de régression correspondant aux équations (9) successives peuvent être considérés comme parallèles. Le terme $b_o$, qui dépend du niveau de l'argile, ne doit pas intervenir dans la comparaison. Pour cela, on dispose d'un *test de coïncidence* (MILLER, 1971).

L'analyse de variance pour chaque série traitée séparément, met en œuvre notamment :
— $[S_i]$ : matrice des sommes de carrés et produits centrés entre $l$ et L + $s$
— $[T_i]$ : vecteur des sommes de produits centrés entre $l$ ou L + $s$ et H
— $SR_i$ : part de variation expliquée par la régression double
— $SE_i$ : variation résiduelle correspondante,
et on pose que [S], [T], SR et SE sont les sommes respectives de ces matrices et scalaires.

Si on considère l'ensemble des N observations, la part de variation totale expliquée par les 4 régressions juxtaposées est SR, le résidu correspondant étant SE, et on n'a pas fait d'hypothèse sur la direction des 4 plans de régression (modèle $M_1$).

Dans l'hypothèse où ces plans ont une direction unique (modèle $M_2$), la part de la variation totale SR se décompose en :
— $SR_p$ : part de variation prise en compte par le modèle $M_2$, qui s'écrit :

$$SR_p = [T]' [S]^{-1} [T]$$

— $SE_p$ : variation résiduelle obtenue par différence ; c'est une estimation de l'écart entre les 2 modèles.

Et l'analyse de la variance s'opère en dressant le tableau 2.

TABLEAU 2

*Test de parallélisme des plans de régression : analyse de variance*
(mélanges complexes)

| Origine de la variation | Somme des carrés | dl |
|---|---|---|
| ($M_2$) plans parallèles | $SR_p$ | 2 |
| écart entre les modèles | $SE_p$ (par différence) | 6 |
| ($M_1$) $b_1$ et $b_2$ quelconques | SR | 2 × 4 |
| résidu | SE | N — 2 × 4 — 1 |

On peut alors effectuer le test de coïncidence en calculant le rapport F entre les carrés moyens « écart entre les modèles » et « résidu ».

2.2.3. *Les échantillons naturels.*

L'expression de l'humidité à pF 3 en fonction de la granulométrie, le taux de matière organique étant inclus dans le pourcentage, est calculée comme pour les mélanges artificiels complexes.

Pour tenter d'améliorer l'explication, on introduit ensuite la capacité d'échange totale, et on cherche si elle peut se substituer à la granulométrie.

## RÉSULTATS

### 1. — *Résultats concernant les mélanges binaires*

En affectant à chaque échantillon la valeur moyenne de l'humidité à pF 3 mesurée, on peut représenter l'ensemble des résultats par les courbes de la fig. 3 :

$$\text{humidité à pF 3} = f \text{ (taux d'argile)}$$

l'abscisse et l'ordonnée étant exprimées en p. 100 du poids.

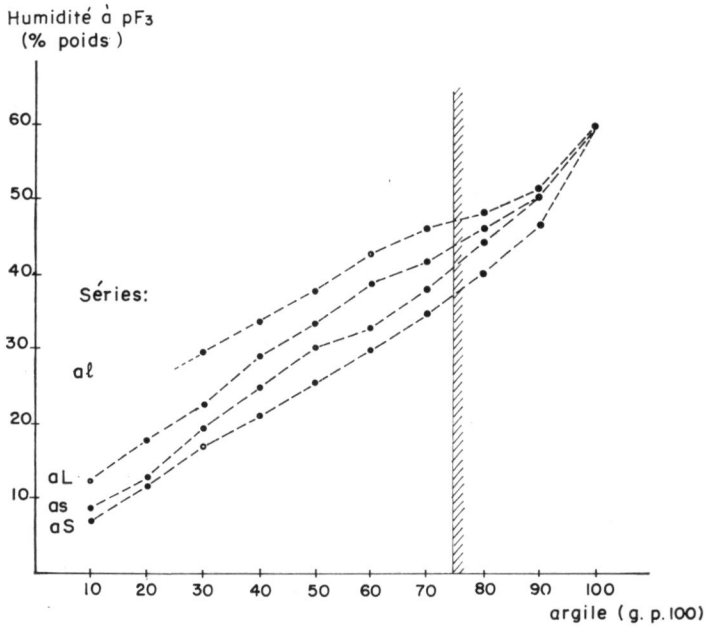



FIG. 3. — *Diagramme de l'humidité à pF 3 en fonction du taux d'argile* (mélanges binaires)
Le domaine de l'ajustement est limité par la gamme 10-70 p. 100 d'argile

Il apparaît que l'humidité à pF 3 augmente continuellement avec le taux d'argile, et que, à un taux d'argile donné, l'humidité à pF 3 est liée à la nature de la fraction associée. La fraction associée doit donc être introduite dans le modèle.

L'allure des courbes obtenues donne une indication favorable à l'ajustement linéaire présenté ci-dessus, sur une gamme de variation du taux d'argile allant jusqu'à 70 p. 100 inclus. Les mélanges binaires ainsi retenus ont alors l'avantage de mieux correspondre aux terres naturelles ainsi qu'aux mélanges complexes, dont le taux d'argile est au maximum de 65 p. 100.

Dans ces conditions, le coefficient de détermination, indiqué dans le tableau 3, est voisin de 0,99 dans tous les cas. Par ailleurs, l'introduction de la composante quadratique $a^2$, intervenant après $a$, n'est jamais significative. Pour chaque série on peut donc considérer que l'additivité est établie.

TABLEAU 3

*Expression de l'humidité à pF 3 en fonction du taux d'argile* (variant de 10 à 70 p. 100) *des mélanges binaires*

| Fractions associées à l'argile | Séries | Équations de régression | Coefficients de détermination |
|---|---|---|---|
| Limon fin | *al* | $H = 0{,}416\ a + 17{,}0$ | 0,998 |
| Limon grossier | *a*L | $H = 0{,}506\ a + 7{,}4$ | 0,992 |
| Sable fin | *as* | $H = 0{,}603\ a + 3{,}5$ | 0,998 |
| Sable grossier | *a*S | $H = 0{,}453\ a + 2{,}8$ | 0,996 |

A partir des coefficients des équations de régression, comme on l'a indiqué, on peut calculer les coefficients d'activité de l'argile $a$ et de la fraction complémentaire $x$ :

$$h_x = \frac{b_o}{100} \qquad h_a = b_1 + \frac{b_o}{100}$$

Les résultats de ce calcul sont donnés par le tableau 4.

TABLEAU 4

*Coefficients d'activité de l'argile et de la fraction associée dans les mélanges binaires*

| Séries | Coefficients d'activité | |
|---|---|---|
| | de l'argile | de la fraction associée |
| *al* | 0,586 | 0,170 |
| *a*L | 0,580 | 0,074 |
| *as* | 0,538 | 0,035 |
| *a*S | 0,481 | 0,028 |

Pour s'assurer que les coefficients d'activité sont significativement différents de zéro, on se limite à un contrôle sur le plus petit : celui du sable grossier.

La relation $b_0 = 100\ h_S$ indique qu'il suffit d'examiner si la droite de régression passe par l'origine. Au moyen du calcul d'un écart $t$ (DAGNELIE, *op. cit.*), on observe que $b_0$ est significativement différent de zéro au seuil $P = 0{,}01$.

On constate en outre que le coefficient d'activité de l'argile varie suivant la fraction qui lui est associée ; à défaut d'un test spécifique, on note que ce coefficient d'activité est d'autant plus faible que la fraction complémentaire est plus grossière.

D'ailleurs, on a observé, dans le cas où la gamme de variation est complète, que la composante $a^2$ est hautement significative dans la régression concernant les mélanges argile-sable grossier.

Ainsi que l'indique la forme des courbes (fig. 3) particulièrement pour les mé-

langes $a$S, l'hypothèse d'additivité proposée n'a donc pas une valeur générale :

— le modèle testé ne rend pas compte du comportement des mélanges à forte teneur en argile,

— l'efficacité de l'argile ne paraît pas indépendante de la nature de la fraction associée.

### 2. — *Résultats concernant les mélanges complexes*

#### 2.1. *Séries définies par le taux d'argile.*

Pour comparer l'effet des substitutions entre les fractions autres que l'argile, on dispose de 4 séries d'échantillons à 5, 15, 25 et 35 p. 100 d'argile respectivement (fig. 1). On fait l'hypothèse que toutes les fractions peuvent agir.

L'analyse de variance progressive sélectionne successivement le limon fin et l'association limon grossier + sable fin ; le sable grossier est alors non significatif.

La série à 25 p. 100 d'argile fait exception : les variables significatives sont, dans l'ordre, le sable grossier et l'association (L + $s$), avec un coefficient de détermination de 0,965. Toutefois, si on impose l'ordre : limon fin, (L + $s$) et sable grossier, on constate que S n'est pas significatif en troisième position et que le coefficient de détermination reste élevé.

On obtient ainsi 4 équations de régression homologues (tabl. 5) qui permettent de tracer, sur les diagrammes de granulométrie, les droites correspondant à une valeur donnée de l'humidité à pF 3 (fig. 1).

TABLEAU 5

*Équation et coefficient de détermination des régressions des mélanges complexes*

| Taux d'argile | Équations de régression | Coefficient de détermination |
|---|---|---|
| 5 | $H = 0{,}241\ l + 0{,}059\ (L + s) + 3{,}80$ | 0,989 |
| 15 | $H = 0{,}198\ l + 0{,}035\ (L + s) + 8{,}83$ | 0,968 |
| 25 | $H = 0{,}194\ l + 0{,}072\ (L + s) + 13{,}42$ | 0,947 |
| 35 | $H = 0{,}172\ l + 0{,}092\ (L + s) + 17{,}15$ | 0,881 |

Ces équations sont de la forme :

$$H = b_1\ l + b_2\ (L + s) + b_o \qquad (9)$$

que l'on peut interpréter dans les termes de l'hypothèse de départ, soit :

$$H = (h_l - h_S)\ l + (h_{L+s} - h_S)\ (L + s) + h_a + h_S\ (100 - a)$$

Pour chaque série, cet ajustement apparaît satisfaisant ;

— en termes statistiques, du fait que les coefficients de détermination sont élevés, et que la variable sable grossier n'est pas significative : le modèle testé suppose en effet que les deux premières variables prennent en compte toute l'information disponible.

— en termes physiques, du fait que les coefficients de corrélation obtenus permettent de retrouver la hiérarchie des coefficients d'activité mise en évidence par l'étude des mélanges binaires. On observe en effet :

$$b_1 > b_2 > 0$$
soit : $h_l - h_S > h_{L+s} - h_S > 0$
d'où : $h_l > h_{L+s} > h_S$

Il convient ensuite de comparer les résultats des 4 séries.

— les 4 équations du type $h_a a + h_S (100 - a) = b_0$ ne permettent pas de calculer $h_a$ et $h_S$, car elles forment un système incompatible.

A défaut d'un test permettant d'évaluer l'incidence de l'erreur d'échantillonnage de $b_o$ , on peut simplement présumer que d'une série à l'autre $h_a$ et $h_S$ peuvent varier.

— la comparaison des 4 régressions permet d'estimer si quel que soit le taux d'argile, les substitutions entre fractions complémentaires ont un effet constant. Cette hypothèse est contrôlée au moyen d'un test de coïncidence dont la mise en œuvre a été exposée ci-dessus.

L'analyse de variance correspondante est résumée dans le tableau 6.

TABLEAU 6

*Test de parallélisme des plans de régression : analyse de variance*

| Origine de la variation | Somme des carrés | dl | Carrés moyens |
|---|---|---|---|
| ($M_2$) plans parallèles | 194 610 | 2 | |
| écart entre les modèles | 6 886 | 6 | 1 147 |
| ($M_1$) $b_1$ et $b_2$ quelconques | 201 496 | 8 | |
| résidu | 6 782 | 93 | 72,9 |

Le rapport F est alors :

$$F_{observé\ (6,93)} = \frac{1147}{72,9} = 15,7 \text{ alors que } F_{théorique} = 4,2 \text{ pour } P = 0,001$$

ce qui montre que les plans de régression ne sont pas parallèles.

En définitive, à un niveau d'argile donné, le modèle additif exprimant l'humidité à pF 3 en fonction du taux des fractions complémentaires peut être considéré comme adéquat avec un degré d'approximation admissible. Mais il apparait imparfait pour rendre compte de l'effet des substitutions entre fractions complémentaires quel que soit le niveau de l'argile.

2.2. *Ensemble des mélanges complexes.*

On étudie en bloc les séries définies par leur taux d'argile, et les échantillons complémentaires comportant 7, 20, 50 et 65 p. 100 d'argile.

Cet ensemble d'échantillons couvre ainsi une large gamme de compositions gra-

nulométriques assez représentatives de celles des terres cultivées. On peut en donner une représentation au moyen d'un diagramme triangulaire classique (argile-limons-sables) en convenant de répartir la fraction (L + *s*) en poids égaux de ses deux composantes (fig. 4). La distribution des variables se décrit aussi en termes de moyenne et de coefficient de variation (tabl. 7).

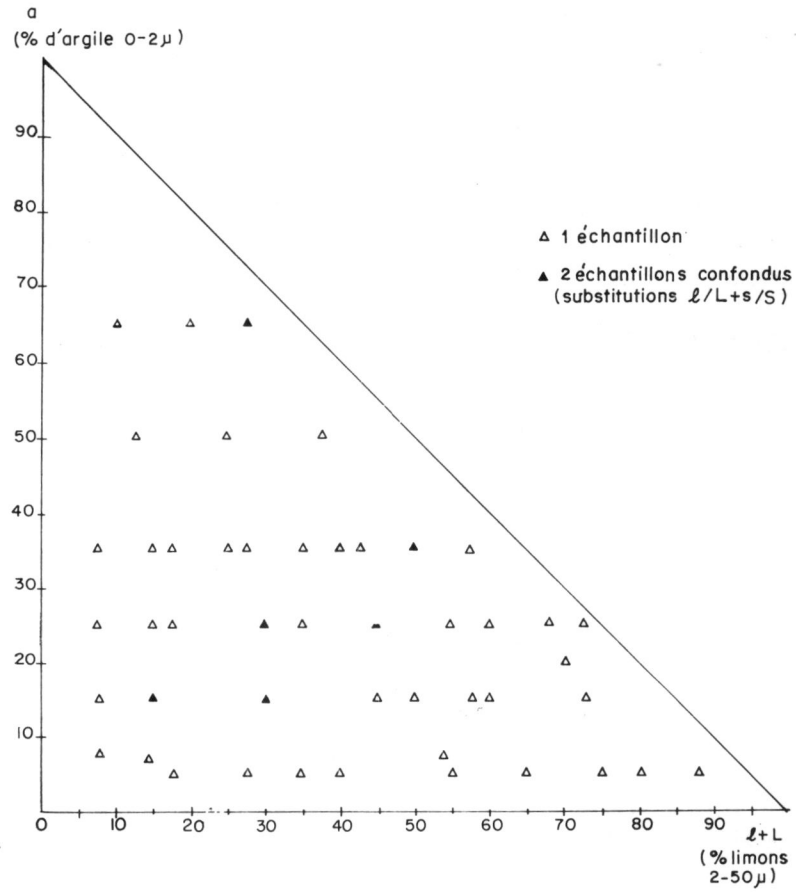



FIG. 4. — *Diagrammes des granulométries simplifiées des mélanges complexes*

TABLEAU 7

*Distribution des variables dans l'ensemble des mélanges complexes*

| Variable | *a* | *l* | (L + *s*) | S | H |
|---|---|---|---|---|---|
| Moyenne | 24,7 | 25,6 | 24,8 | 24,8 | 19,9 |
| C. V. | 65 | 93 | 95 | 97 | 40 |

Les 4 variables de la granulométrie sont introduites dans le modèle. En opérant par sélection successive, les variables significatives sont dans l'ordre $a$, S et (L + $s$) et $l$ est non significative. Le coefficient de détermination est alors de 0,954.

Il y a donc une variable et une seule qui soit non significative, ce qui est normal puisque toutes les fractions du mélange sont contrôlées.

On obtient en outre dans l'équation $H = b_1 a + b_2 S + b_3 (L + s) + b_o$ :

$$b_1 > 0 > b_3 > b_2$$

soit, d'après les égalités définies précédemment

$$h_a - h_l > 0 > h_{L+s} - h_l > h_S - h_l$$

qui est équivalent à :

$$h_a > h_l > h_{L+s} > h_S$$

Ce résultat est donc satisfaisant, mais afin d'obtenir une équation de régression plus voisine de celles obtenues ci-dessus et par divers auteurs, on peut fixer ainsi l'ordre d'introduction des variables : $a$, $l$, L + $s$, S.

On constate alors que la dernière variable introduite n'est pas significative, comme précédemment (tabl. 8).

TABLEAU 8

*Analyse de la variance de l'humidité à pF 3 des échantillons naturels*
(ordre des variables imposé)

| Origine de la variation | Variance | dl | F |
|---|---|---|---|
| Rég. $a$ | 213 662 | 1 | 95 |
| résidu | 2 257 | 49 | — |
| Rég. $a$, $l$ | 150 095 | 2 | 300 |
| Rég. partielle $l$ | 85 528 | 1 | 173 |
| résidu | 501 | 48 | — |
| Rég. $a$, $l$, (L + $s$) | 103 339 | 3 | 342 |
| Rég. partielle (L + $s$) | 9 826 | 1 | 32 |
| résidu | 303 | 47 | — |
| Rég. $a$, $l$, (L + $s$), S | 77 591 | 4 | 257 |
| Rég. partielle S | 348 | 1 | 1 |
| résidu | 302 | 46 | — |
| Variation totale | 6 485 | 50 | — |

De plus, le coefficient de détermination obtenu est alors de 0,953 et ne s'écarte donc pas du coefficient obtenu dans les conditions les plus favorables du point de vue statistique.

Compte tenu des observations faites antérieurement, on a contrôlé aussi l'incidence éventuelle des termes quadratiques $a^2$, $l^2$, $(L + s)^2$ et $S^2$. On constate que leur introduction à la suite des 4 termes simples permet d'atteindre un coefficient de détermination de 0,973 ; toutefois, aucun n'est significatif au seuil P = 0,001.

L'équation de régression obtenue s'écrit :

$$H = 0{,}486\, a + 0{,}210\, l + 0{,}071\, (L + s) + 0{,}80$$

Si on écrit, comme on l'a indiqué précédemment, les coefficients de régression en termes de coefficients d'activité, il vient immédiatement :

$$h_S = \frac{b_o}{100} = 0{,}008 \qquad h_a = b_1 + \frac{b_o}{100} = 0{,}494$$

$$h_l = b_2 + \frac{b_o}{100} = 0{,}218 \qquad h_{L+s} = b_3 + \frac{b_o}{100} = 0{,}079$$

Ce qui permet d'exprimer H en faisant apparaître le modèle additif complet :

$$H = 0{,}494\ a + 0{,}218\ l + 0{,}079\ (L + s) + 0{,}008\ S \qquad (10)$$

Pour le calcul de H, les deux formules sont évidemment équivalentes. Mais, à la différence de l'équation de régression, l'expression en termes de coefficients d'activité a l'intérêt de faire apparaître toutes les variables impliquées dans l'ajustement.

Testée sur un échantillon présentant de fortes gammes de variation, l'hypothèse d'additivité paraît donc permettre une bonne prévision du comportement de la terre.

### 3. — *Résultats concernant les échantillons naturels*

Les terres étudiées présentent des granulométries variées comme le montre la figure 2 ; les histogrammes des principales variables explicatives (fig. 5) permettent

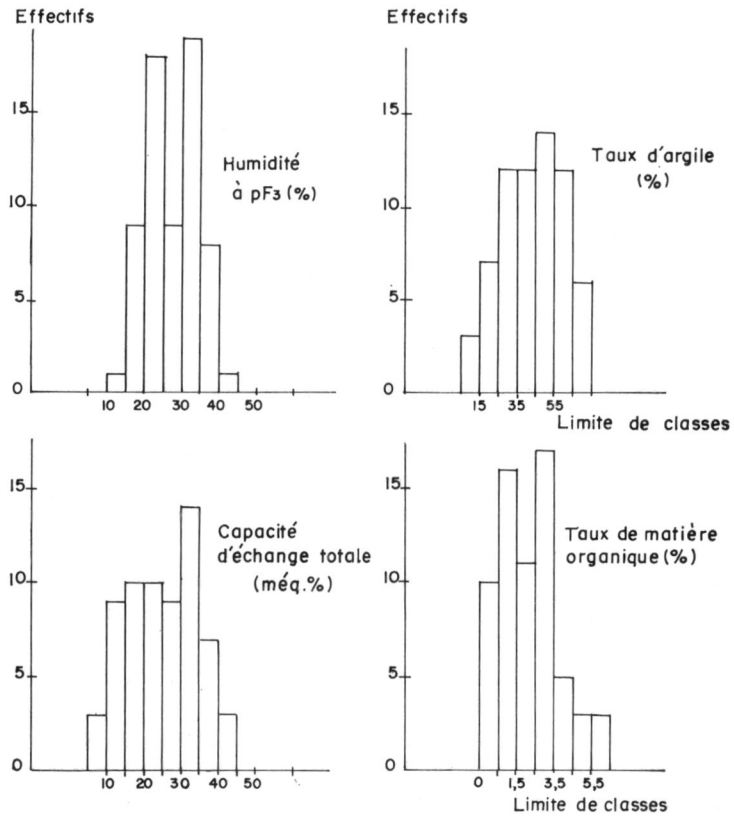



FIG. 5. — *Histogrammes de l'humidité à pF 3 et des principales variables explicatives* (terres de Lorraine)

de préciser leur position et leur dispersion. Cette description est complétée par le tableau des coefficients de corrélation (tabl. 9) qui met en évidence les liaisons, multiples et très inégales, entre les variables.

TABLEAU 9

*Coefficients de corrélation entre les variables granulométriques, la capacité d'échange totale et l'humidité à pF 3 des terres naturelles*

| Variables | Abréviation | *a* | *l* | L | *s* | S | *m. o.* | C. E. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Argile | *a* | — | | | | | | |
| Limon fin | *l* | — 0,65 | — | | | | | |
| Limon grossier | L | — 0,91 | 0,67 | — | | | | |
| Sable fin | *s* | — 0,35 | — 0,28 | 0,15 | — | | | |
| Sable grossier | S | — 0,62 | 0,04 | 0,46 | 0,22 | | | |
| Matière organique | *m. o.* | 0,30 | — 0,18 | — 0,41 | — 0,14 | — 0,27 | — | |
| Capacité d'échange totale | C. E. | 0,85 | — 0,70 | — 0,82 | — 0,21 | — 0,39 | 0,39 | — |
| Humidité à pF 3 | H | 0,83 | — 0,65 | — 0,81 | — 0,22 | — 0,44 | 0,45 | 0,94 |

Valeurs critiques : P = 0,01, $|r| = 0{,}31$
P = 0,001, $|r| = 0{,}39$.

3.1. *Expression de l'humidité à pF 3 en fonction de la granulométrie.*

Les variables explicatives proposées sont les mêmes que pour les mélanges artificiels complexes, complétées par le taux de matière organique.

Dans ces conditions, pour l'ensemble des terres, les variables explicatives retenues sont l'argile et la matière organique. Le limon fin vient ensuite, mais son introduction n'est pas significative au seuil P = 0.01 (tabl. 10).

TABLEAU 10

*Analyse de la variance de l'humidité à pF 3 en fonction de la granulométrie des terres naturelles*

| Origine de la variation | Variance | dl | F |
|---|---|---|---|
| Rég. *a*, *m.o.* | 1 102,7 | 2 | 97 |
| Rég. partielle *m.o.* | 132,9 | 1 | 10,5 |
| résidu | 12,7 | 62 | — |
| Rég. *a*, *m.o.*, *l* | 738,1 | 3 | 64 |
| Rég. partielle *l* | 69,0 | 1 | 5,9 |
| résidu | 11,7 | 61 | — |
| Variation totale | 46,7 | 64 | — |

On retient, en définitive, l'équation de régression :

$$H = 0{,}34\ a + 0{,}90\ m.o. + 10{,}8 \qquad (11)$$

où H est l'humidité à pF 3, $a$ le taux d'argile et $m.o.$ le taux de matière organique, exprimés en p. 100 du poids de terre sèche.

Cet ajustement permet d'obtenir un coefficient de détermination égal à *0,729*.

Bien qu'il manque ici un test pour contrôler la signification du terme constant de l'équation de régression obtenue avec des variables centrées, on peut estimer erronée l'interprétation des coefficients de régression en termes de coefficients d'activité, compte tenu de l'importance du terme constant de l'équation (11).

On peut procéder par analogie avec les estimations précédentes en faisant l'hypothèse que toutes les fractions autres que l'argile et la matière organique jouent le même rôle vis-à-vis de la rétention d'eau. On peut écrire ainsi que le résidu R

$$R = l + L + s + S$$

a un coefficient d'activité $h_R$ et que l'hypothèse d'additivité s'écrit :

$$H = h_a\ a + h_{m.o.}\ m.o. + h_R\ R$$

Comme précédemment, on procède par élimination, et on obtient :

$$H = (h_a - h_R)\ a + (h_{m.o.} - h_R)\ m.o. + 100\ h_R$$

Par comparaison avec l'équation de régression (11), on en déduit :

$$h_R = \frac{10{,}8}{100} = 0{,}108 \quad \text{ou} \quad h_a = 0{,}336 + 0{,}108 = 0{,}444$$

$$\text{ou} \quad h_{m.o.} = 0{,}902 + 0{,}108 = 1{,}010$$

ce qui permet en particulier d'obtenir pour l'argile un coefficient d'activité comparable à ceux calculés précédemment.

Cette interprétation ne peut pas être contrôlée au moyen de données traitées ici, mais elle montre au moins que la description globale permise par le calcul de régression n'est valable que pour des échantillons analogues à l'échantillon étudié.

Cette conclusion s'impose plus fortement si on considère les résultats des deux groupes vernaculaires, où les variables explicatives proposées sont l'argile, le limon fin et la matière organique. Au seuil P = 0,01, la seule variable significative est l'argile qui permet un coefficient de détermination de 0,18 pour les « grosses terres » et de 0,84 pour les « blanches terres ».

### 3.2. *Expression de l'humidité pF 3 en fonction de la capacité d'échange totale et de la granulométrie.*

Compte tenu de l'origine des terres étudiées, on peut penser qu'elles présentent des constitutions minéralogiques variées. La capacité d'échange totale (C.E.) peut donner une idée de cette diversité.

On a donc introduit cette caractéristique dans le modèle explicatif.

Le graphique H = $f$ (C.E.) indique nettement une liaison entre les deux variables (fig. 6), qui est confirmée par le calcul (tabl. 9).

La sélection successive des variables fait apparaître la capacité d'échange totale comme seule variable explicative significative (tabl. 11) ; le taux de matière organique, intervenant ensuite, n'est pas significatif au seuil P = 0,01.

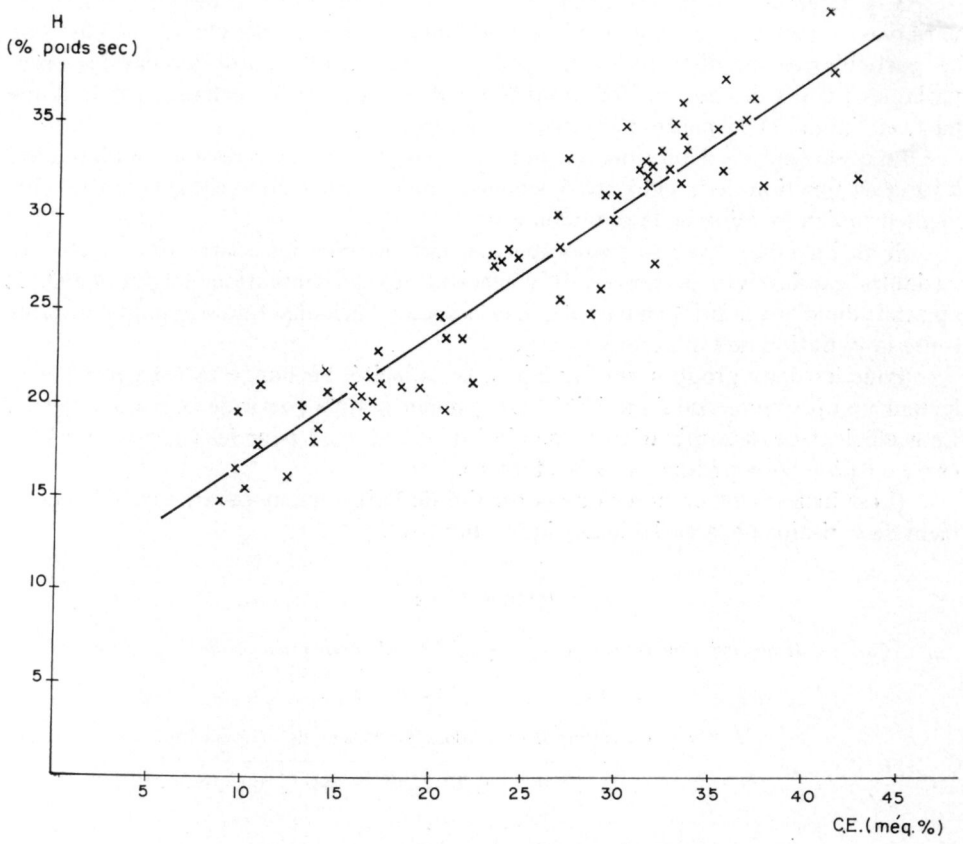



FIG. 6. — *Diagramme de l'humidité à pF 3 en fonction de la capacité d'échange totale* (terres de Lorraine)

TABLEAU II

*Analyse de la variance de l'humidité à pF 3 en fonction de la capacité d'échange totale et de la granulométrie des terres de Lorraine*

| Origine de la variation | Variance | dl | F |
|---|---|---|---|
| Rég. C. E. | 2 650,9 | 1 | 492 |
| résidu | 5,4 | 63 | — |
| Rég. C. E., *m.o.* | 1 337,3 | 2 | 262 |
| Rég. partielle *m.o.* | 23,7 | 1 | 4,6 |
| résidu | 5,1 | 62 | — |
| Variation totale | 46,7 | 64 | — |

L'équation de régression obtenue s'écrit :

$$H = 0{,}701\ C.E. + 9{,}69 \qquad (12)$$

A la différence du cas précédent, on ne peut pas faire l'hypothèse que toutes les variables ne figurant pas dans la régression jouent le même rôle. On sait en effet que les particularités de distribution ne sont pas seules à introduire des liaisons entre variables : il y a des liaisons fonctionnelles entre la capacité d'échange totale d'une part, et l'argile et la matière organique d'autre part.

Le coefficient de détermination obtenu est de *0,885*. L'expression de l'humidité à pF 3 en fonction de la capacité d'échange totale permet donc un ajustement bien meilleur qu'en fonction de la granulométrie.

Si on introduit, sans se préoccuper de leur signification statistique, toutes les variables explicatives proposées, le coefficient de détermination atteint *0,893*. Il apparaît donc que la prise en compte de la capacité d'échange totale explique presque toute la variation de l'humidité à pF 3.

Pour les deux groupes vernaculaires, la capacité d'échange totale permet également un ajustement de l'humidité à pF 3 meilleur qu'à partir de la granulométrie. Le coefficient de détermination passe ainsi de 0,18 à 0,48 pour les « grosses terres », et de 0,84 à 0,89 pour les « blanches terres ».

Il est intéressant de noter que la qualité de l'ajustement paraît suivre le coefficient de variation de la variable expliquée (tabl. 12).

TABLEAU 12

*Coefficients de variation des variables et coefficients de détermination des régressions*

| | Coefficient de variation | | | Coefficient de détermination | |
|---|---|---|---|---|---|
| | H | *a* | C. E. | H = *f*(*a*) | H = *f*(C. E.) |
| Ensemble | 25 | 37 | 37 | 0,729 | 0,885 |
| « Grosses terres » | 6 | 19 | 10 | 0,18 | 0,48 |
| « Blanches terres » | 28 | 54 | 51 | 0,84 | 0,89 |

Cette convergence illustre bien la portée limitée des calculs de régression lorsque les gammes de variation des variables contrôlées sont réduites.

En définitive, il apparaît établi que la capacité d'échange totale convient mieux que les taux de l'argile et de la matière organique pour rendre compte de l'humidité à pF 3 des terres étudiées.

## DISCUSSION DES RÉSULTATS

### 1. — *Les échantillons artificiels*

L'étude du comportement des mélanges artificiels permet d'isoler le rôle de la granulométrie dans l'humidité à pF 3, puisque les variations de forme ou de nature des fractions ne peuvent pas intervenir dans l'échantillon étudié.

Les *mélanges binaires* permettent de montrer que toutes les fractions associées à l'argile ont un rôle significatif.

Au-dessous de 70 p. 100 d'argile, le modèle additif permet de calculer les coefficients d'activité correspondants avec une excellente précision. Tout se passe comme si la porosité utile à la rétention d'eau à pF 3 était, pour chaque fraction, proportionnelle à son taux pondéral. En raisonnant par analogie avec un système de capillaires ou d'éléments sphériques, il apparaît que les valeurs respectives des coefficients d'activité s'ordonnent de façon plausible.

Toutefois, l'ajustement est moins satisfaisant lorsque le calibre de la fraction associée à l'argile augmente, et d'autre part, le coefficient d'activité de l'argile décroît simultanément. Il faudrait donc d'autres hypothèses pour proposer un ajustement de valeur plus générale, ce qui implique le contrôle d'autres paramètres.

Au-dessus de 70 p. 100 d'argile environ, tous les mélanges binaires présentent un écart marqué avec le modèle valable pour les taux inférieurs. On retrouve le fait que les terres argileuses ont un comportement particulier ; avec les mêmes échantillons, KHEYRABI et MONNIER (1968) ont montré que si le taux d'argile croît, la stabilité mesurée par le taux d'agrégats stables présente un maximum atteint avant le taux de 100 p. 100 d'argile.

A défaut d'une théorie explicative générale, il faut considérer que les terres argileuses relèvent d'une analyse spécifique.

Les séries de *mélanges complexes* définies par leur taux d'argile permettent d'étudier l'effet des substitutions entre les fractions complémentaires. Cette étude se justifie par le fait que l'argile est le facteur prépondérant de la rétention d'eau à pF 3 en même temps qu'elle joue un rôle actif dans l'architecture du matériau étudié, comme le montrent les travaux cités sur la stabilité structurale. L'analyse au moyen du modèle additif apparaît plausible du fait que le taux d'argile est au maximum de 35 p. 100.

Ceci étant, on a constaté que les plans de régression obtenus aux 4 niveaux d'argile étudiés ne peuvent pas être considérés comme parallèles. Les modalités des substitutions entre variables peuvent jouer : les caractéristiques de distribution des variables (tabl. 13) montrent en effet que les taux des différentes fractions ne sont pas bien équilibrés.

TABLEAU 13

*Distribution des variables des séries de mélanges complexes*

| Taux d'argile | Fractions associées | | | | | | Humidité à pF 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *l* | | L + *s* | | S | | | |
| | moyenne | c. v. | moyenne | c. v. | moyenne | c. v. | moyenne | c. v. |
| 5 | *37,0* | 85 | *34,8* | 81 | *23,3* | 105 | *14,7* | 45 |
| 15 | *24,6* | 90 | *34,3* | 77 | *26,1* | 105 | *14,9* | 28 |
| 25 | *27,8* | 86 | *24,4* | 94 | *22,0* | 103 | *20,6* | 20 |
| 35 | *22,5* | 81 | *20,8* | 89 | *21,7* | 89 | *22,9* | 13 |

On peut constater aussi, en se reportant aux tableaux 5 et 13, que le coefficient de détermination diminue en même temps que le coefficient de variation de la variable expliquée : lorsque le taux d'argile augmente, les variations dues aux fractions associées à l'argile diminuent par rapport aux variations d'origine incontrôlée.

Indépendamment de ces raisons d'ordre statistique, il y a bien lieu de penser que le modèle proposé est moins adéquat en termes physiques, à mesure que le taux d'argile augmente. On peut le contrôler, indirectement, au moyen d'un calcul complémentaire : on introduit après les taux des trois fractions et sans contrôler leur signification, les composantes quadratiques $l^2$, $(L + s)^2$ et $S^2$. On constate alors (tabl. 14) que les rapports de variance F des régressions partielles successives augmentent avec le taux d'argile ; les coefficients de détermination se situent alors tous aux environs de 0,98.

TABLEAU 14

*Rapports de variances et coefficients de détermination des régressions comportant les termes quadratiques* (mélanges complexes)

| Taux d'argile | F des régressions partielles | | | Coefficient de détermination |
|---|---|---|---|---|
| | $l^2$ | $(L + s)^2$ | $S^2$ | |
| 5 | 0,4 | 2,7 | 0,1 | 0,989 |
| 15 | 5,1 | 5,6 | 0,6 | 0,976 |
| 25 | 7,2 | 4,3 | 6,3 | 0,981 |
| 35 | 9,5 | 10,9 | 69,4 | 0,987 |

On peut donc conclure qu'il est délicat de transposer aux mélanges complexes es conclusions permises par l'étude des mélanges binaires. Le modèle additif utilisant les teneurs pondérales doit être complété par d'autres hypothèses permettant de contrôler notamment l'effet de l'argile.

Lorsqu'on regroupe les mélanges complexes, le modèle ne cerne pas mieux le phénomène physique sous-jacent, mais l'ajustement apparaît plus satisfaisant du fait que les gammes de variation sont élargies. Cette constation marque bien les limites du contrôle de l'ajustement.

### 2. — *Les échantillons naturels*

L'humidité à pF 3 se prête à un bon ajustement en fonction des taux d'argile et de matière organique, mais deux difficultés importantes sont à souligner.

D'abord, comme on l'a montré pour les échantillons artificiels, le contrôle statistique de la qualité de l'ajustement dépend des gammes de variation des variables étudiées. Ainsi, le fait que l'ajustement global soit meilleur que l'ajustement pour le sous-ensemble des « grosses terres » s'explique par le fait que, dans ce dernier cas, la part de variance incontrôlée devient grande relativement à la variance totale.

En second lieu, l'interprétation en termes de coefficients d'activité n'est possible qu'au prix d'hypothèses simplificatrices : il faut supposer connue l'importance du rôle respectif des fractions que le modèle ne retient pas. On relève aussi l'opposition

entre la conclusion du test statistique qui les classe non significatives et la conclusion de l'étude des mélanges artificiels.

On peut toutefois conclure qu'à des fins de prévision le résultat statistique convient parfaitement, mais que l'interprétation nécessite de faire intervenir les fractions complémentaires, comme le montre l'étude des mélanges complexes définis par leur taux d'argile.

Cette double nécessité de faire des hypothèses simplificatrices et de limiter les variations incontrôlées explique qu'on recherche une certaine homogénéité des échantillons étudiés. La pratique courante consiste à subdiviser l'échantillon initial sur la base de l'origine lithologique ou plus généralement du type de sol. L'inconvénient manifeste du procédé est qu'il peut y avoir autant de résultats que d'échantillons.

De plus, la subdivision peut ne pas être efficace comme le montre le cas des terres de Lorraine étudiées. Dans cet échantillon, la définition granulométrique de l'argile masque des différences notables de constitution minéralogique dont on peut avoir un aperçu en en examinant la capacité d'échange totale. Le rapport argile/matière organique étant de l'ordre de 20 en moyenne, on peut en première approximation négliger le rôle de la matière organique et rapporter la capacité d'échange totale au seul taux d'argile (fig. 7). Il apparaît ainsi une grande diversité du rapport CE/*a* qui a suggéré l'introduction de la capacité d'échange totale dans l'ajustement de l'humidité à pF 3.

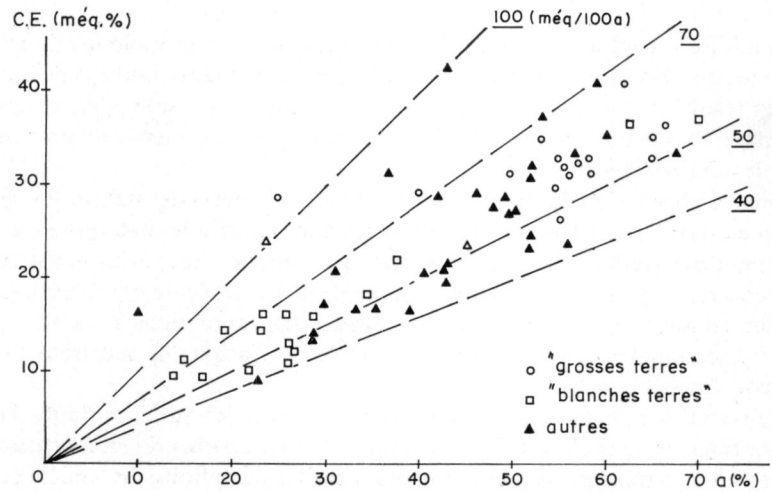



FIG. 7. — *Diagramme de la capacité d'échange totale en fonction du taux d'argile* (terres de Lorraine)

Lorsqu'on traite à part les « grosses terres », on isole un groupe de terres de granulométrie semblable, où l'équilibre des différentes fractions est plus homogène que dans l'échantillon global ; mais, par contre, ainsi que le montre la figure 7, la variabilité du rapport CE/*a* n'est pas réduite. Ainsi s'explique le fait que l'ajustement en fonction de la granulométrie donne un coefficient de détermination de 0,18 contre 0,73 pour l'ensemble des terres.

Outre la base de l'échantillonnage, on peut aussi mettre en cause le choix des

variables explicatives, grâce à l'enregistrement de données supplémentaires. On a ainsi mis en évidence, pour l'échantillon de terres de Lorraine, l'importance de la capacité d'échange totale. Sa prise en compte permet à elle seule un coefficient de détermination de 0,885 pour l'ensemble de l'échantillon. Ce résultat peut paraître assez inattendu, car la rétention d'eau met en jeu d'autres caractéristiques que les sites d'échange des cations.

Il faut toutefois noter que l'échantillon étudié est à dominante argileuse : le taux d'argile moyen est de 42,5 p. 100. De ce fait, la capacité d'échange totale peut rendre compte de cette caractéristique texturale dominante ; de plus, elle traduit de façon synthétique le rôle des propriétés physico-chimiques dont la granulométrie ne rend que difficilement, ou pas du tout, compte : la nature minéralogique et la garniture de cations échangeables. De plus, la capacité d'échange totale caractérise globalement la quantité et le degré d'évolution de la matière organique dont le rôle est bien connu. Enfin, la constitution de l'échantillon est telle que les taux d'argile et aussi des limons fin et grossier sont fortement corrélés avec la capacité d'échange totale (cf. tabl. 9).

A défaut d'une méthode plus élaborée, cette constatation peut suggérer de caractériser le comportement de ces terres par la capacité d'échange totale, le taux de sables, et à un moindre dégré, le taux de matière organique.

## CONCLUSION

L'humidité du sol à pF 3 s'exprime en fonction de la granulométrie au moyen d'un ajustement linéaire, obtenu par le calcul de régressions multiples. La comparaison des résultats obtenus avec des échantillons naturels d'une part, et des échantillons artificiels plus ou moins complexes d'autre part, permet d'éclairer les possibilités et les limites de cette approche.

Il faut d'abord signaler une difficulté liée à la méthode statistique utilisée : l'ajustement, testé par l'analyse de variance, n'apparaît adéquat que si la gamme de variation des variables étudiées est grande par rapport aux variations non contrôlées qui constituent la base de comparaison dans les tests de signification : outre l'erreur expérimentale, interviennent les liaisons et interactions possibles entre les fractions granulométriques et éventuellement les variations de nature à l'intérieur d'une classe dimensionnelle.

L'utilisation de mélanges artificiels permet de maintenir invariante la nature de chaque fraction granulométrique et d'opérer toutes sortes de substitutions entre les fractions. On peut ainsi faire apparaître les limites de validité du modèle étudié.

Le rôle de toutes les fractions granulométriques peut être considéré comme additif :

— dans le cas des mélanges binaires aux taux d'argile inférieurs à 70 p. 100 ;

— dans le cas des mélanges complexes, le taux d'argile étant fixé.

Par contre, il n'y a pas d'additivité si les substitutions entre fractions concernent aussi l'argile, dont le rôle particulier est ainsi mis en évidence. On ne peut donc pas admettre que la rétention d'eau d'un échantillon soit rigoureusement la somme de la rétention spécifique de chaque fraction, même si le modèle permet une bonne prévision pour l'ensemble des mélanges complexes. Pour proposer un meilleur ajustement, il faudrait donc introduire de nouveaux paramètres.

Lorsqu'on traite des échantillons naturels, les particularités de la minéralogie ou de la distribution de la granulométrie font que les équations sont différentes suivant que l'on considère tous les échantillons ou des sous-ensembles. Les résultats sont donc contingents du groupe d'échantillons étudié et valables uniquement pour des échantillons analogues, sans qu'on puisse définir avec précision cette analogie.

Pour les terres de Lorraine étudiées, l'introduction des propriétés minéralogiques sous la forme de la capacité d'échange totale améliore considérablement l'explication du modèle, ce qui montre bien que la considération de la seule dimension des particules est insuffisante.

On esquive en général les difficultés résultant des particularités des échantillons en subdivisant l'ensemble des données suivant la nature du matériau ; mais simultanément le nombre de valeurs traitées diminue et on peut aussi réduire la variabilité contrôlée au point qu'il n'y ait plus de régression significative. Plutôt que la technique d'analyse, c'est le choix des variables explicatives et des bases d'échantillonnage qu'il convient alors de remettre en question.

Le calcul de l'humidité du sol à pF 3 à partir d'un modèle additif utilisant le taux des fractions granulométriques ou une donnée physico-chimique comme la capacité d'échange totale, n'est qu'une approche sommaire du phénomène, mais il a une bonne valeur de prévision à condition de prendre certaines précautions. Il faut que le coefficient exprimant l'activité de chacune des variables utilisées ait été vérifié quand on part d'une formule déjà établie ou recalculé sur un échantillon représentatif de la population étudiée.

Cette technique présente d'autres intérêts, en dehors de son utilité à des fins de prévision. Les écarts entre le résultat du calcul et la mesure peuvent permettre de caractériser le comportement des terres, car la modification de la relation entre la granulométrie et l'humidité à pF 3 traduit une particularité de la texture. Ce qui peut suggérer un critère de classement des terres dont l'origine profonde est à rechercher :

— soit dans les particularités de la granulométrie,
— soit dans les propriétés spécifiques de telle ou telle fraction et cette analyse peut alors susciter des hypothèses pour un nouveau programme de travail.

*Reçu pour publication en mars 1971.*

## SUMMARY

### THE INFLUENCE OF SOIL CONSTITUENTS ON ITS MOISTURE CONTENT AT PF 3

The soil moisture content at pF 3 may be expressed in several ways in terms of soil particle-size distribution, by means of linear combinations of selected separates. In order to evaluate their choice and the mathematical model employed, two highly different samples were submitted to a single method of statistical analysis.

These were, on the one hand, soil samples from triassic formations of Lorraine, and on the other, artificial samples made by KHEYRABI and MONNIER (1968). The latter are composed from identical materials, of clay and another separate (binary mixtures), or clay at four main concentration levels (5, 15, 25 and 35 p. 100) and material from other particle-size ranges, which are mutually substituted (complex mixtures). Soil moisture content at pF 3 is fitted to the particle-size distribution, according to an additive model determined by regression calculation.

Verification of the adjustment by means of progressive variance analysis only tests overall description, since it is dependent on the composition of the studied sample (possible connections between controlled variables, occurrence of uncontrolled variations). The artificial samples are more reliable from this viewpoint ; their all particle-size fractions are shown to perform an additive function :

— first, in binary mixtures, when the clay content is below 70 p. 100,

— then, in complex mixtures, when the clay content is fixed.

On the other hand, the additive function is insufficient — what we may call a textural effect — if the substitutions also include clay, which evidently plays a special role.

For the bulk of the complex mixtures, moisture content at pF 3 is well predicted on the basis of particle-size distribution. The determination coefficient is 0.95 for the equation :

Moisture content at pF 3 = 0.494 clay + 0.218 fine silt
+ 0.079 (coarse silt + fine sand) + 0.008 coarse sand
(all quantities expressed in percentage weight).

Due to improperly controllable variations in form and nature, such prediction is also valid, but less precise for Lorraine soils, on the basis of clay and organic matter content (determination coefficient : 0.73).

However, as shown by consideration of sub-groups based on vernacular categories, such prediction may be insufficient if the size definition of the constituents covers in fact a wide range of variations in physico-chemical properties. Stress in thus laid on the role of total exchange capacity, which allows, for the bulk of the soils under study, the best prediction of moisture content at pF 3 (determination coefficient : 0.89).

## ZUSAMMENFASSUNG


### EINFLUSS DER BESTANDTEILE DES BODENS AUF SEINE FEUCHTIGKEIT BEI PF 3

Es gibt zahlreiche Ausdrücke für die Feuchtigkeit des Bodens bei pF 3 in Abhängigkeit von der Körnchengrösse unter der Form von linearen Zusammenstellungen der Raten der granulometrischen Bruchteile. Mit dem Ziel, die Auswahl der Bruchteile und des mathematischen Modells zu treffen, wurden zwei sehr verschiedene Stichprobengruppen derselben statistischen Behandlung unterworfen.

Es wurden einerseits Bodenstichproben untersucht, die aus Triasformationen aus Lothringen stammten und anderseits künstliche Stichproben, die KHEYRABI und MONNIER (1968) zuzuschreiben sind. Diese letzteren bestehen, ausgehend von identischen Materialien, entweder aus Ton und einem anderen granulometrischen Bruchteil (binäre Mischungen) oder aus Ton mit 4 vorzüglichen Niveaus (5, 15, 25 und 35 p. 100), nebst anderen Fraktionen zwischen denen Substitutionen durchgeführt werden (komplexe Mischungen). Die Einstellung der Feuchtigkeit auf pF 3 bei der Körnchengrössenbestimmung erfolgt gemäss einem zusätzlichen Modell mittels Regressionsberechnung.

Die Kontrolle der Einstellung mittels der progressiven Streuungsanalyse beurteilt nur die Qualität der Gesamtbeschreibung, denn sie ist namentlich von der Beschaffenheit des behandelten Gesamtobjektes abhängig (etwaigen Bindungen der kontrollierten Verhänderlichen, Einwirkungen von unkontrollierten Veränderungen). Die künstlichen Mischungen, die in dieser Hinsicht mehr Sicherheit bieten, erlauben zu zeigen, dass die Rolle eder gesamten granulometrischen Bruchteile als zusätzlich beurteilt werden kann :

— im Falle der binären Mischungen mit Tonanteil niedriger als 70 p. 100 ;

— im Falle der komplexen Mischungen, mit bestimmtem Ton anteil.

Dagegen gibt es keine Zusetzlichkeit — was man Gefügewirkung nennen kann — wenn die Substitionen zwischen den Bruchteilen sich ebenfalls auf den Ton beziehen, dessen besondere Rolle hierdurch hervorgehoben wird.

Mittels der Körnchengrössenbestimmung können die gesamten komplexen Mischungen einer guten Vorausberechnung der Feuchtigkeit bei pF 3 unterzogen werden. Der Bestimmungskoeffizient beträgt 0,95 für die Gleichung :

Feuchtigkeit bei pF 3 = 0,494 Ton + 0,218 feiner Lehm
+ 0,079 (grober Lehm, feiner Sand) + 0,008 grober Sand
(Sämtliche Angaben in Gewichtsprozenten)

Mit einer geringerem Genauigkeit, in Anbetracht der möglichen Beschaffenheits- und Formabweichungen, bieten auch die lothringischen Böden auf Grund des Anteils an Ton und an organischem Material Vorausberechnungsmöglichkeiten. Der Bestimmungskoeffizient beträgt hierbei 0,73.

Wie die Untersuchung von Untergruppen, die auf der Grundlage von einheimischen Kategorien gebildet wurden, gezeigt hat, kann diese Vorausberechnung jedoch zu einem Fehler führen, wenn die Dimensionsbestimmung der Bestandteile starke Veränderungen der chemisch-physikalischen Eigenschaften aufweist. Auf diese Weise wurde die Rolle der gesamten Austauschkapazität aufgezeigt, die für die Gesamtheit der untersuchten Böden, die charakteristischste Veränderliche der Feuchtigkeit bei pF 3 (Bestimmungskoeffizient : 0,89) ist.

N. B. — pF = der dekadische Logarithmus des Kapillarpotentials.

## РЕЗЮМЕ

Влияние составных почвы на ее влажность при pF3.

П. Л. ОСТИ.

Существует много выражений влажности почвы при pF3, в зависимости от гранулометрии, в форме линейных комбинаций содержания гранулометрических фракций. Делается попытка оценить выбор фракций и математических моделей, при помощи одной и той же статистической обработки двух групп совершенно различных образцов почв.

С одной стороны изучались образцы почв триасовых формаций Лотарингии, с другой :

— Искуственные образцы приготовленные Хейраби и Моннье (1968) из идентичных материалов, глины и других гранулометрических фракций (бинарные смеси), глины с 4-мя предпочтительными уровнями (5, 15, 25 и 35 %) и иных фракций, с произведенными между ними замещениями (сложные смеси). Урегулирование влажности при pF3 с гранулометрией, по дополнительной модели, достигалось с помощью рассчета регрессии.

Контроль урегулирования проведенный с помощью прогрессивного анализа изменчивости, позволяет судить только о качестве общего описания, так как оно особенно зависит от состава обработанной совокупности (возможные связи между контролируемыми переменными, последствия вариаций не поддающихся контролю). Искуственные смеси представляют больше гарантий в этом смысле, и они позволяют доказать что роль всех гранулометрических фракций должна рассматриваться как аддитивная :

1) в случаях бинарных смесей с содержанием глины не достигающим 70 %.

2) в случаях сложных смесей с заданным содержанием глины;

И наоборот, аддитивности не существует — и это можно назвать эффектом текстуры, — в случаях когда замещения фракций относятся также и к глине, особенная роль которой подчеркивается таким образом.

Все сложные смеси легко поддаются прогнозу влажности при pF3 на базе гранулометрии; коэффициент определения равен 0,95 для формулы : влажность при pF3 = 0,494 глина + 0,218 мелкий суглинок + 0,079 (грубый суглинок, мелкий песок) + 0,008 (грубый песок) — все данные в процентах по весу.

Прогноз возможен также, правда с меньшей точностью ввиду изменчивости природы и особенно форм, и для почв Лотарингии, на базе содержания в них глины и органического вещества. Коэффицент определения равен в этом случае 0,73.

Но, как было доказано, в частности изучением суб-совокупностей составленных на базе местных категорий, прогноз этот может быть ошибочным, если определение размеров составных скрывает в действительности сильные изменения физико-химических свойств. Таким образом подчеркивается роль общей емкости обмена, которая для всех изученных почв представляет лучшую об'яснительную переменную влажности при pF3.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


DAGNELIE P., 1970. *Théorie et méthodes statistiques*, vol. 2, p. 296 et 335, Duculot, S. A., Gembloux.

DEFFONTAINES J.-P., GRAS R., 1968. Les facteurs techniques de la production de la pêche tardive en Moyen Vivarais. *Ann. agron.*, **19** (1), 5-51.

GRAS R., 1962. Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la Vallée du Rhône entre Vienne et Valence. *Ann. agron.*, **13** (2), 141-174.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

LEVY G., 1968. Contribution à l'étude des propriétés des sols forestiers en Lorraine. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, **5**, 3-14.

MILLIER C., 1971. (Communication personnelle).

*Ann. agron.*, 1971, **22** (4), 477-480.

# CHRONIQUE DES LIVRES

S. SHEER. — FUNDAMENTAL OF DISPLAY SYSTEM DESIGN. — New York, Wiley-Interscience, 1970, 484 p.

Un nombre assez important d'ouvrages ont été publiés ces derniers temps, qui traitent de l'acquisition de l'information (métrologie générale) et de son traitement (informatique). Peu de ces ouvrages s'intéressent à l'affichage même des résultats et le présent comble heureusement cette lacune.

L'œil prend connaissance des mesures grâce à l'affichage de leur valeur. Celui-ci objective pour l'expérimentateur le monde des phénomènes et joue le rôle de médiateur entre le monde physique et l'expérimentateur ; il doit de ce fait présenter une double adaptation d'une part à la chaîne instrumentale dont il est le terminal et d'autre part au récepteur d'entrée de l'observateur : pratiquement toujours l'œil. De la qualité de cette adaptation dépend la transmission fidèle de l'information.

En 484 pages, l'ouvrage, en américain, rassemble autour du thème de l' « affichage » un grand nombre de données jusque-là éparses dans la littérature de toutes les disciplines : optique, photographie, électronique, informatique, physiologie de la vision, métrologie. Il se complète de synthèses originales et s'agrémente de schémas très clairs. Il constitue en outre un recueil des définitions et des unités spécifiquement utilisées par les techniques de l'affichage.

L'ouvrage traite, sur le mode didactique, la théorie et la pratique des systèmes passés en revue. Il le fait de façon suffisamment complète et progressive pour que le lecteur, tant physicien que biologiste, à condition qu'il soit pourvu d'une formation scientifique de base, y trouve la compréhension de la technologie des nombreux et divers systèmes modernes d'affichage et que le spécialiste de ces techniques y retrouve l'information de base regroupée.

Cette double fonction est favorisée par le soin particulier que l'auteur a apporté à l'appendice de 51 pages qui comprend :

— un glossaire de 176 termes ;

— une bibliographie de 445 références classées méthodiquement en 30 rubriques ;

— un index des 290 auteurs cités ;

— un index alphabétique de 11 pages, des sujets traités ou abordés. Les éléments ainsi rassemblés autour de ce thème le sont pour la première fois avec cette densité, à notre connaissance.

C. GOILLOT

W. BROUWER. — HANDBUCH DES SPEZIELLEN PFLANZENBAUES. — 2 vol., Berlin, Hamburg, Paul Parey, 1970, 1 120 p.

Le domaine de la Production végétale est très divers et complexe et il subit l'influence de presque toutes les disciplines agricoles et d'un grand nombre de disciplines scientifiques, techniques et économiques. Le développement constant des connaissances scientifiques entraîne la spécialisation du chercheur, ce qui est en même temps une des conditions du progrès de la science. Cependant une des conséquences regrettables de la spécialisation, c'est le risque de ne plus avoir une vue d'ensemble sur une branche très complexe.

Ce manuel de la Production végétale spécialisée doit permettre de contrebalancer ce danger qui menace aussi la Production végétale, en montrant les relations qui existent entre la génétique appliquée, la botanique, la phytosociologie, la physiologie végétale, la science du sol, la fumure et l'alimentation des plantes cultivées en substances nutritives, la phytopharmacie, la technologie agricole, l'économie agricole ainsi que la politique agricole et la transformation des produits végétaux pour la nourriture de l'Homme et des animaux, et en regroupant toutes les connaissances spécialisées dans une étude d'ensemble sur la production végétale spécialisée.

L'ouvrage rassemble sous forme de monographies les connaissances acquises ces vingt der-

nières années sur les cultures de zones tempérées : (Vol. 1) : le Blé, le Seigle, le Maïs, l'Orge, l'Avoine et la Pomme de terre, la Betterave ; (Vol. 2) : le Colza, la Navette, le Petit pois et la fèverole, sans aborder en détail les problèmes spécifiques de l'amélioration des plantes, puisque le *Handbuch der Pflanzenzüchtung* publié par KAPPERT et RUDORF, 2e édition (Verlag Paul Parey) y est consacré.

La valeur de ce Manuel vient de ce qu'il relie la théorie à la pratique. Les connaissances théoriques et les hypothèses qui en découlent y sont traitées aussi bien que les problèmes d'utilisation pratique et de transformation industrielle de la production agricole brute, et l'importance économique des cultures.

Grâce à une revue bibliographique internationale abondante sur tous les problèmes importants concernant la production végétale spécialisée, ce manuel doit également permettre d'orienter des recherches personnelles.

Il constitue un ouvrage de référence, qui rend compte à la fois de l'état actuel des connaissances scientifiques et des progrès réalisés dans la production végétale. Il n'a pas son équivalent en langue allemande ni sans doute dans d'autres pays.

D. HILLEL. — SOIL AND WATER. PHYSICAL PRINCIPLES AND PROCESSES. — New York, London, Academic Press, 1971, 302 p. (Coll. Physiological ecology).

Ce livre traite des interactions sol-eau, des phénomènes physiques qui sont à la base de ces interactions, ainsi que du sol en tant que réservoir dynamique d'eau pour les plantes.

La première partie est consacrée aux propriétés physiques du sol et de l'eau qui y est contenue. Il y est question du système disperse à trois phases que constitue le sol, de la structure et de la texture, des propriétés mécaniques et des phénomènes de surface et d'adsorption. Un chapitre s'occupe des propriétés physiques de l'eau : structure et états moléculaires, pression de vapeur, capillarité, pression osmotique, adsorption. Le chapitre suivant traite plus spécifiquement de l'état de l'eau dans le sol et des problèmes physico-mathématiques qui se posent dans ce domaine. Des chapitres spéciaux sont consacrés aux mouvements de l'eau dans les sols, aussi bien saturés que non saturés.

La deuxième partie comprend une étude de l'eau dans le sol des champs cultivés. Il y est traité en détail de l'infiltration de l'eau dans le sol, ses modalités et sa traduction mathématique, ses variations selon le type de sol. Suit une étude de la redistribution de l'humidité du sol après l'infiltration et des facteurs intervenant dans ce processus ; dans les chapitres suivants on trouve une analyse des problèmes de drainage, ainsi qu'une étude approfondie des phénomènes d'évaporation.

L'utilisation de l'eau du sol par les plantes est ensuite étudiée : les anciennes et nouvelles conceptions sur l'eau utilisable sont exposées, ainsi que les relations eau-plante-atmosphère. Le mouvement de l'eau est étudié en relation avec le système des racines, avec les vitesses de succion et de transpiration.

Un chapitre est consacré à l'étude de l'équilibre de l'eau dans la rhizosphère, ainsi qu'à l'étude de l'équilibre énergétique total.

Deux appendices sont joints, qui traitent des expressions mathématiques et des solutions numériques de l'équation du flux.

Ce livre est destiné à faciliter la résolution des problèmes qui peuvent se poser dans l'utilisation des conditions hydrauliques diverses en agriculture, grâce à la compréhension des phénomènes physiques impliqués.

J. A. TAYLOR ed. — THE ROLE OF WATER IN AGRICULTURE (based on papers and discussions at a symposium held at the Welsh Plant Breeding Station, near Aberystwyth on March 19th, 1969). — Oxford, New York, Pergamon Press, 1970, 230 p. (University College of Wale Aberystwyth, Memorandum nº 12).

Ce volume qui réunit plusieurs articles présentés lors d'un symposium tenu près d'Aberystwyth en mars 1969, et les discussions qui ont suivi est consacré au rôle de l'eau dans l'agriculture britannique. Il y est question aussi bien de l'étendue et de la qualité des ressources en eau disponibles, que de l'organisation de la satisfaction des demandes provenant de divers types d'utilisateurs et de la planification à long terme de l'allocation des ressources à des demandeurs, sur les plans régionaux et national.

Les premiers chapitres traitent de l'importance des mesures de précipitations atmosphériques, ainsi que de l'évapotranspiration et de l'équilibre de l'eau dans les divers terrains. Plusieurs cha-

pitres sont consacrés à l'utilisation de l'eau en agriculture et aux conséquences de divers traitements agronomiques sur la qualité de l'eau utilisable.

Les chapitres suivants s'occupent de l'aspect économique de la gestion et de l'organisation des ressources en eau. Les divers modes d'irrigation et leur planification sont ensuite traités.

J.-A. GAUTIER, P. MALANGEAU, F. PELLERIN, dir. — ACTUALITÉS DE CHIMIE ANALYTIQUE, ORGANIQUE, PHARMACEUTIQUE ET BROMATOLOGIQUE. — 20ème série, Paris, Masson, 1971, 206 p.

Avec cet ouvrage, vingtième de la série, les Mises au point sont devenues Actualités de chimie analytique.

Ce volume comprend 6 articles :

— F. PELLERIN. Évolution et perspective.

— M. MIOCQUE, J.-M. VIERFOND. Dosage de l'hydrogène mobile. Étude comparative des méthodes chimiques.

— M. HOSSENLOPP. Isolement de substances pures par extraction liquide-liquide. Développements récents.

— J. PASTOR. Applications de l'analyse discontinue indirecte au contrôle industriel.

— F. ROUSSELET. Spectrométrie d'absorption atomique : applications analytiques à la biologie et à la bromatologie.

— P. TEISSEIRE. Aspects modernes de l'analyse des huiles essentielles. Problèmes annexes.

Anal. de l'éd.

FERTILIZER MANAGEMENT PRACTICES FOR MAIZE : RESULTS OF EXPERIMENTS WITH ISOTOPES. RESULT OF A FOUR-YEAR CO-ORDINATED RESEARCH PROGRAMME OF THE JOINT FAO/IAEA DIVISION OF ATOMIC ENERGY IN FOOD AGRICULTURE. — IAEA, Vienne, 1970, 78 p., (Technical Rep. Series, nº 121).

Cet ouvrage est le résultat d'une expérience de coopération entre huit pays de 1964 à 1968, dans un essai en champ sur la fertilisation du maïs, en utilisant les isotopes radioactifs de N et P pour marquer les engrais.

Chaque année les mêmes traitements et techniques ont été utilisés dans chaque expérience de manière à donner des résultats significatifs, et à mesurer les effets des conditions variables de sol et de climat.

Le premier objectif de ces quatre années de coopération était de déterminer le type de fertilisation nécessaire au maïs dans une région donnée.

Les généralisations suivantes ne peuvent être considérées comme étant applicables à quelques cas particuliers, mais comme un guide général de l'utilisation des engrais en culture de maïs.

— L'application des engrais azotés et phosphorés dans une bande adjacente aux lignes de semis, accélère l'assimilation des éléments P, mais n'a aucun effet sur l'assimilation de l'azote.

— L'enfouissement des engrais azotés au moment du semis est moins efficace que l'application en bande.

— L'application d'engrais azotés au moment du semis est essentielle, et une application au moment de la formation des épis est également très efficace.

— L'efficacité est identique pour différents composés azotés : $(NH_4)_2SO_4$, $NH_4NO_3$, $(NH_2)_2CO$ utilisés soit en application au moment du semis soit à un autre moment de la croissance.

— Le rendement en maïs croît (37 p. 100) avec une fertilisation azotée bien conduite.

— L'assimilation de l'azote du sol par le Maïs n'est pas affectée par la fertilisation azotée.

— La transformation de l'azote des engrais au niveau des protéines du maïs dépend des pratiques fertilisantes employées, mais pour un optimum de fertilisation, l'augmentation du taux est de 25 p. 100.

— L'utilisation des engrais azotés par les cultures a augmenté d'environ 40 p. 100 pendant ce programme de 4 ans avec des variations allant de 20 à 70 p. 100 en fonction des conditions de sol et de climat.

De nombreux tableaux groupés à la fin de l'ouvrage résument les résultats de ces expériences.

G. M. VAN DYNE. — THE ECOSYSTEM CONCEPT IN NATURAL RESOURCE MANAGEMENT. — New York, London, Academic Press, 1969, 383 p.

Ce livre traite du concept d'écosystème et de ses applications à la recherche et aux utilisations des sciences sur les ressources naturelles. La première section étudie l'origine et le développement historique de la notion d'écosystème et de la terminologie spécifique.

La deuxième section montre, sur quelques exemples, l'application de ces notions dans le développement et les résultats effectifs de la recherche.

Un chapitre est consacré aux procédés d'étude d'un écosystème de prairie, un autre à un écosystème de bassin hydrographique, un troisième, enfin, à un système de toundra arctique. Tous ces systèmes sont analysés du point de vue de l'organisation de la recherche dans ces divers domaines, de la préparation du plan scientifique, de l'application des modèles théoriques et de l'organisation du travail.

La troisième section est consacrée à l'exploitation et à la gestion des ressources naturelles, en se servant des notions théoriques sur les écosystèmes. Les exemples portent sur la science forestière, la pêche, l'alimentation en eau.

La quatrième et dernière section comprend une étude d'un système d'enseignement et de formation à la recherche et à la gestion concernant les ressources naturelles, par l'introduction des conceptions modernes sur les écosystèmes.

M. Brière, B. Jouve, R. Paulin. — Mesures en radioactivité. — Manuel pratique d'utilisation des rayonnements nucléaires. — Paris, Hermann éd., 1970, 264 p. (Collection actualités scientifiques et industrielles 1325).

Cet ouvrage a pour origine l'enseignement et l'assistance technique donnés par les auteurs au sein du Commissariat à l'énergie atomique à de nombreux stagiaires de laboratoire sur les procédés de détection de mesure de la radioactivité.

Conçu dans un esprit pratique, le volume a deux objectifs essentiels :

— Fournir une vue d'ensemble sur les principes de base, appareillages et techniques les plus couramment utilisés, et rassembler toutes les données concrètes ainsi que les renseignements utiles qu'on ne peut actuellement trouver que disséminés dans une bibliographie éparse ;

— expliciter un certain nombre de points fondamentaux, généralement mal exprimés ou exposés de façon trop complexe par les ouvrages de base, et dont la complète élucidation est indispensable pour la claire compréhension des phénomènes en jeu et des problèmes à résoudre.

La première partie traite des divers procédés de détection de la radioactivité et de la technologie électronique associée.

La seconde partie apporte un certain nombre de compléments et de précisions sur les techniques de préparation et d'utilisation des radioéléments.

La troisième partie comporte un bref rappel de notions mathématiques fondamentales et constitue un recueil de diverses courbes, tables et données numériques qui interviennent couramment dans les problèmes de radioactivité.

En annexe : bibliographie, renseignements commerciaux, tables, exemples, rappel mathématique.

An. éd.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions ;* f) *résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 16 × 24 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve a corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Agronomie.

*Le directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 9-1971

*Dépôt légal: 3eme trimestre 1971. N° d'impression: 1002.*

# annales agronomiques

Bimestriel

1971

Vol. 22. N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1971, **22** (5), 487-513.

# CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU MÉCANISME DU COMPACTAGE DES SOLS

## NOTION DE POTENTIEL DE LUBRIFICATION

A. FAURE

avec la collaboration technique de G. LACLIE

*Station centrale d'Agronomie,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

A l'aide de matériaux obtenus par mélange d'un sable et d'une argile et compactés dans un moule selon la technique Proctor, il a été possible de justifier la présence d'un certain volume d'eau (appelée eau excédentaire car elle n'a pas été utilisée pour gonfler l'argile) nécessaire pour que l'échantillon soit compacté au maximum. Cette nécessité peut s'expliquer en donnant à cette eau excédentaire des propriétés lubrifiantes.

Grâce à des hypothèses simples, introduisant la notion de potentiel de lubrification et donnant à l'échantillon un rôle de réservoir d'eau excédentaire, nous avons pu établir les lois de variations, en fonction de la teneur en argile, de la teneur en eau et de la densité apparente lorsque l'échantillon est à son maximum de compacité.

Trois phases ont été ainsi mises en évidence :
— pour de faibles teneurs en argile (inférieures à 10 p. 100 environ), seule l'eau excédentaire a une action lubrifiante ;
— de 10 à 18 p. 100 environ, à l'action lubrifiante de l'eau excédentaire s'ajoute une lubrification proportionnelle à la quantité d'argile présente dans l'échantillon ;
— au-delà de 18 p. 100, à l'action lubrifiante de l'eau excédentaire s'ajoute une lubrification due à l'argile, mais indépendamment de la quantité d'argile mise en jeu.

Les équations font ressortir des possibilités de comportements différents selon les propriétés gonflantes de l'argile utilisée. Seule l'étude d'autres mélanges pourrait apporter une confirmation et des précisions supplémentaires aux résultats énoncés.

## INTRODUCTION

Le comportement d'un sol pour une action mécanique donnée est fonction de ses constituants physiques, de son état d'humidité et de sa compacité. Il n'existe cependant entre ces paramètres aucune loi physique explicitée par la théorie alors que l'influence de l'humidité et des composantes granulométriques sur la compacité

d'un matériau est très grande. La connaissance de relations basées sur des hypothèses fondamentales entre l'état de compacité, ou l'état d'humidité, et les composantes physiques d'un matériau fournirait la solution à de nombreux problèmes d'ordre théoriques ou pratiques.

Du point de vue théorique, il serait alors possible de comprendre le processus d'arrangement des grains inertes (sables ou limons) et de définir les rôles joués par l'argile et par l'eau contenues dans le matériau.

Du point de vue pratique, un certain nombre de tests qui répondraient aux problèmes posés aux agriculteurs par le travail du sol pourrait être défini, notamment dans le choix de la période optimale de ces travaux ou dans la connaissance moins empirique de l'état des sols.

L'établissement de ces lois fondamentales ne peut être fait que par étapes successives de façon que l'orientation des recherches tienne compte des résultats précédemment obtenus. La première étape que nous nous sommes fixée ici est l'étude des états de compacité de mélanges binaires sable-argile.

Le compactage est obtenu en utilisant la technique Proctor (PELTIER, 1959; TERZAGHI et PECK, 1961). Nous avons cependant réduit les dimensions du moule à 300 $cm^3$ (diamètre 70 mm et hauteur 78 mm) mais, pour conserver l'énergie standard de 60 $tm/m^3$, nous avons réduit le poids de la dame à 1 kg et sa hauteur de chute à 20 cm.

Nous avons utilisé deux familles de mélanges binaires. Elles contiennent toutes les deux la même argile : une kaolinite provenant d'un sol du Perche et rendue calcique après son extraction. Le squelette sableux de la première famille est constitué d'éléments fins connus sous le nom de Sable de Fontainebleau, celui de la deuxième famille est un squelette grossier appelé Sable de Brou. Les granulométries de ces deux squelettes sont les suivantes :

| | Fontainebleau (%) | Brou (%) |
|---|---|---|
| Limon fin ..... | — | 0,4 |
| Limon grossier..... | 0,15 | 2 |
| Sable fin ..... | 65,6 | 9 |
| Sable grossier ..... | 34,1 | 89 |

Chaque matériau obtenu par mélange est noté $FK_i$ ou $BK_i$ selon qu'il appartient à l'une ou à l'autre de ces familles. L'indice $i$ permet de distinguer dans une même famille deux matériaux de teneurs en argile (A p. 100) différentes. La fabrication de chacun d'entre eux a été effectuée en laboratoire à partir des constituants initiaux mis dans les proportions voulues par mélange dans une auge avec un excès d'eau. Une fois la pâte rendue aussi homogène que possible, le matériau obtenu est séché à 105° puis broyé et tamisé à 2 mm.

Pour apprécier l'état de compacité de ces matériaux, nous avons déterminé la densité apparente $\gamma_d$ (poids total sec de l'échantillon compacté rapporté au volume total qu'il occupe lorsqu'il est humide) donnée par un échantillon à teneur en eau pondérale $w$ p. 100 qui a subi le traitement de la technique Proctor.

Nous avons ainsi mesuré les variations de la densité apparente en fonction de la teneur en eau et nous pouvons constater, comme il fallait s'y attendre, que la

densité apparente passe par une valeur maximale pour une certaine valeur de la teneur en eau.

Nous ne nous intéresserons dans cet article qu'aux caractéristiques des matériaux compactés à leur densité maximale, la position de ces maximums, c'est-à-dire les valeurs de $\gamma_d$ et de $w$ au maximum des courbes, dépendant de la valeur de la teneur en argile. La figure 1 permet de se rendre compte qualitativement des variations de ces maximums grâce à quatre matériaux dont les teneurs en argile sont très distinctes.

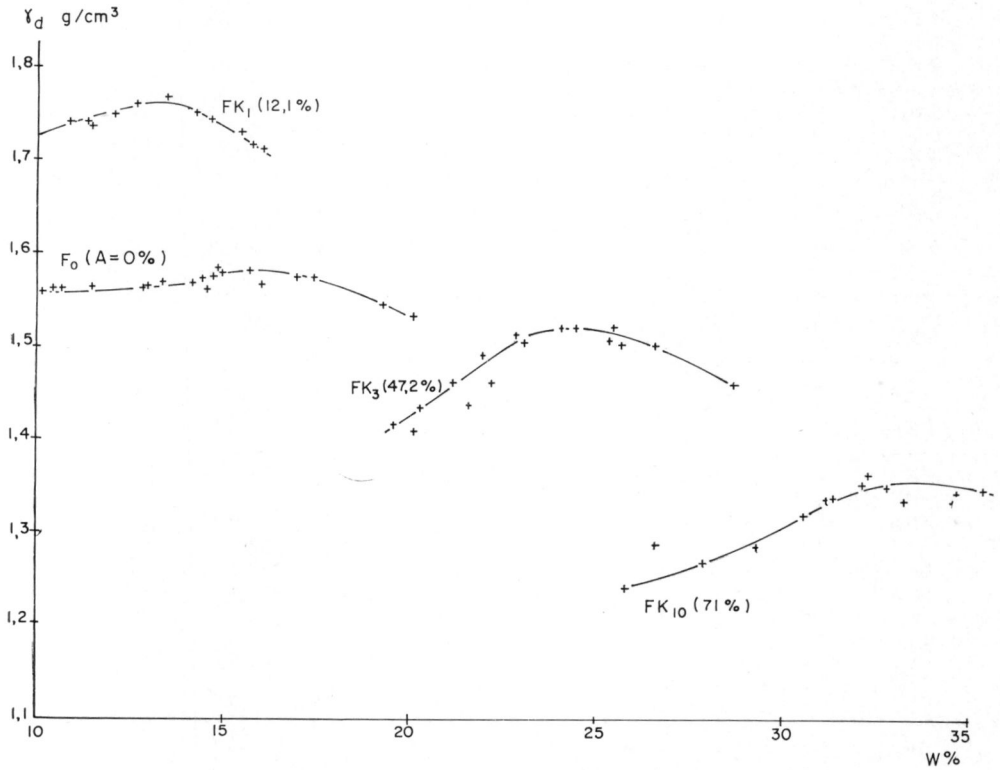



FIG. 1. — *Influence de la teneur en argile sur le comportement au compactage*

La densité réelle des grains étant G = 2,67 g/cm³ ; le tableau 1 précise, outre les valeurs numériques expérimentales au maximum des courbes de $\gamma_d$ et de $w$, celles de :

$\sigma$ : taux d'occupation volumique du squelette (volume de squelette dans 100 cm³ de matériau humide) ;

$h_v$ : humidité volumique (volume d'eau contenue dans un échantillon dont le volume à l'état humide est de 100 cm³) ;

$\frac{w}{A}$ : qui représente le poids d'eau rapporté au poids d'argile. L'utilisation de ce paramètre se justifie par le fait que les éléments du squelette ont tous un diamètre équivalent supérieur à 100 $\mu$ et par conséquent ne fixent qu'une quantité négligeable d'eau.

TABLEAU I

*Tableau récapitulatif des valeurs expérimentales*

| Nom | A | $w$ | $\gamma d$ | $\sigma$ | $h_v$ | $\frac{w_v}{A}$ | U | $v_1$ | $\frac{g\,A}{d}$ | $V_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $F_0$ | 0,02 | 15,8 | 1,583 | 59,4 | 25,0 | — | 15,80 | 9,88 | 0 | 15,8 |
| $FK_4$ | 3,7 | 14,4 | 1,663 | 60,00 | 23,95 | 3,890 | 15,92 | 8,08 | 1,42 | 12,98 |
| $FK_{11}$ | 7,4 | 13,3 | 1,742 | 60,45 | 23,20 | 1,757 | 16,35 | 6,36 | 2,84 | 10,46 |
| $FK_{13}$ | 9,85 | 13,3 | 1,760 | 59,42 | 23,40 | 1,309 | 17,36 | 5,65 | 3,78 | 9,52 |
| $FK_1$ | 12,1 | 13,4 | 1,762 | 58,00 | 23,60 | 1,109 | 18,40 | 5,26 | 4,75 | 8,65 |
| $FK_9$ | 16,4 | 13,9 | 1,852 | 57,89 | 25,77 | 0,857 | 20,66 | 2,34 | 6,30 | 7,60 |
| $FK_2$ | 24,0 | 15,8 | 1,800 | 51,46 | 28,00 | 0,658 | 25,70 | 1,36 | 9,22 | 6,58 |
| $FK_{14}$ | 26,2 | 16,9 | 1,762 | 48,70 | 29,78 | 0,645 | 27,69 | 1,42 | 10,06 | 6,84 |
| $FK_8$ | 31,4 | 18,3 | 1,715 | 44,05 | 30,85 | 0,594 | 31,22 | 1,40 | 12,07 | 6,23 |
| $FK_{12}$ | 36,6 | 20,9 | 1,633 | 38,8 | 34,25 | 0,574 | 36,00 | 1,49 | 14,05 | 6,85 |
| $FK_3$ | 47,2 | 24,3 | 1,520 | 30,06 | 36,94 | 0,523 | 43,75 | 2,29 | 18,12 | 6,18 |
| $FK_6$ | 62,0 | 30,0 | 1,413 | 20,45 | 42,80 | 0,494 | 55,55 | 1,07 | 23,8 | 6,20 |
| $FK_{10}$ | 71,0 | 33,5 | 1,350 | 14,66 | 45,20 | 0,471 | 62,70 | 0,5 | 27,25 | 6,25 |
| $K_0$ | 100,0 | 44,5 | 1,150 | 0,60 | 52,20 | 0,435 | 85,70 | 1,3 | 38,40 | 6,10 |
| $B_0$ | 0,0 | 14,1 | 1,660 | 62,10 | 23,40 | — | 14,10 | 8,7 | 0 | 14,1 |
| $BK_{13}$ | 3,4 | 12,6 | 1,759 | 63,63 | 22,50 | 3,760 | 14,0 | 6,7 | 1,30 | 11,30 |
| $BK_7$ | 5,5 | 11,8 | 1,804 | 63,84 | 21,63 | 2,182 | 14,06 | 5,94 | 2,11 | 9,69 |
| $BK_{10}$ | 7,1 | 11,70 | 1,824 | 63,46 | 21,40 | 1,648 | 14,62 | 5,38 | 2,73 | 8,97 |
| $BK_2$ | 11,3 | 11,60 | 1,880 | 62,40 | 21,80 | 1,025 | 16,25 | 3,69 | 4,34 | 7,26 |
| $BK_{11}$ | 12,0 | 12,0 | 1,892 | 62,40 | 22,70 | 0,983 | 16,95 | 2,89 | 4,61 | 7,39 |
| $BK_{14}$ | 15,95 | 12,90 | 1,910 | 60,12 | 24,64 | 0,809 | 19,47 | 1,41 | 6,12 | 6,78 |
| $BK_8$ | 18,7 | 13,68 | 1,868 | 56,97 | 25,60 | 0,732 | 21,39 | 1,65 | 7,18 | 6,50 |
| $BK_4$ | 23,8 | 15,25 | 1,814 | 51,85 | 27,60 | 0,641 | 25,05 | 1,44 | 9,14 | 6,11 |
| $BK_3$ | 25,2 | 16,40 | 1,786 | 50,00 | 28,95 | 0,651 | 26,79 | 1,22 | 9,68 | 6,72 |
| $BK_6$ | 30,9 | 17,80 | 1,762 | 47,65 | 30,95 | 0,565 | 30,52 | 0,29 | 11,85 | 5,95 |
| $BK_9$ | 39,9 | 21,40 | 1,620 | 36,50 | 34,65 | 0,536 | 37,82 | 1,39 | 15,32 | 6,08 |
| $BK_{12}$ | 51,5 | 26,10 | 1,494 | 28,42 | 38,9 | 0,512 | 47,30 | 1,41 | 19,80 | 6,3 |

Si nous considérons que ce rapport représente la quantité d'eau adsorbée par un gramme d'argile, sans se préoccuper pour l'instant des limites éventuelles d'adsorption, nous pouvons calculer également :

$v$ : volume d'un gramme d'argile ayant adsorbé $\frac{w}{A}$ grammes d'eau

$v = \frac{w}{A} + \frac{1}{d}$ où $d = 2{,}427$ est la densité *réelle* de l'argile et en déduire :

$U = vA$ : volume occupé par l'argile et l'eau dans un échantillon dont le poids sec est de 100 grammes.

Ces 100 grammes occupant un volume apparent de $\frac{100}{\gamma_d}$ cm³, nous pouvons calculer le volume occupé par l'air dans cet échantillon, soit $v_1$ ce volume :

$$v_1 = \frac{100 - \sigma}{\gamma_d} - U$$

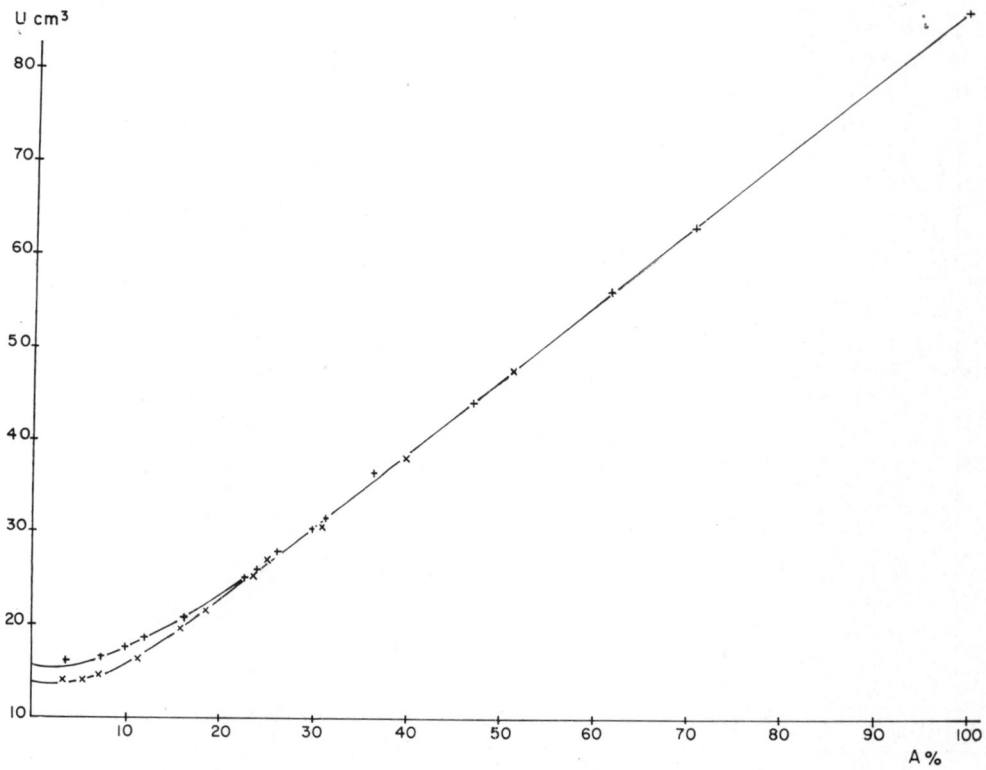



FIG. 2. — *Variations du volume occupé par l'argile et l'eau*

Les points représentent les résultats expérimentaux de
+ la famille FK
× la famille BK
Les courbes sont tracées à partir des considérations théoriques

## I. — OBSERVATIONS DES RÉSULTATS

Les graphiques et le tableau précédents mettent en évidence l'influence de la teneur en argile sur l'arrangement des éléments constitutifs du matériau. Cet arrangement est caractérisé notamment par les grandeurs mesurées $\gamma_d$ et $w$, ou par les grandeurs dont les valeurs sont déduites de ces dernières. Nous avons tracé les variations de U, $\gamma_d$ et $v_1$, en fonction de A, sur les figures 2, 3 et 4 qui nous permettent de constater que les deux familles ont des comportements qualitativement analogues. Lorsque la teneur en argile varie de 0 à 100 p. 100, nous voyons qu'il

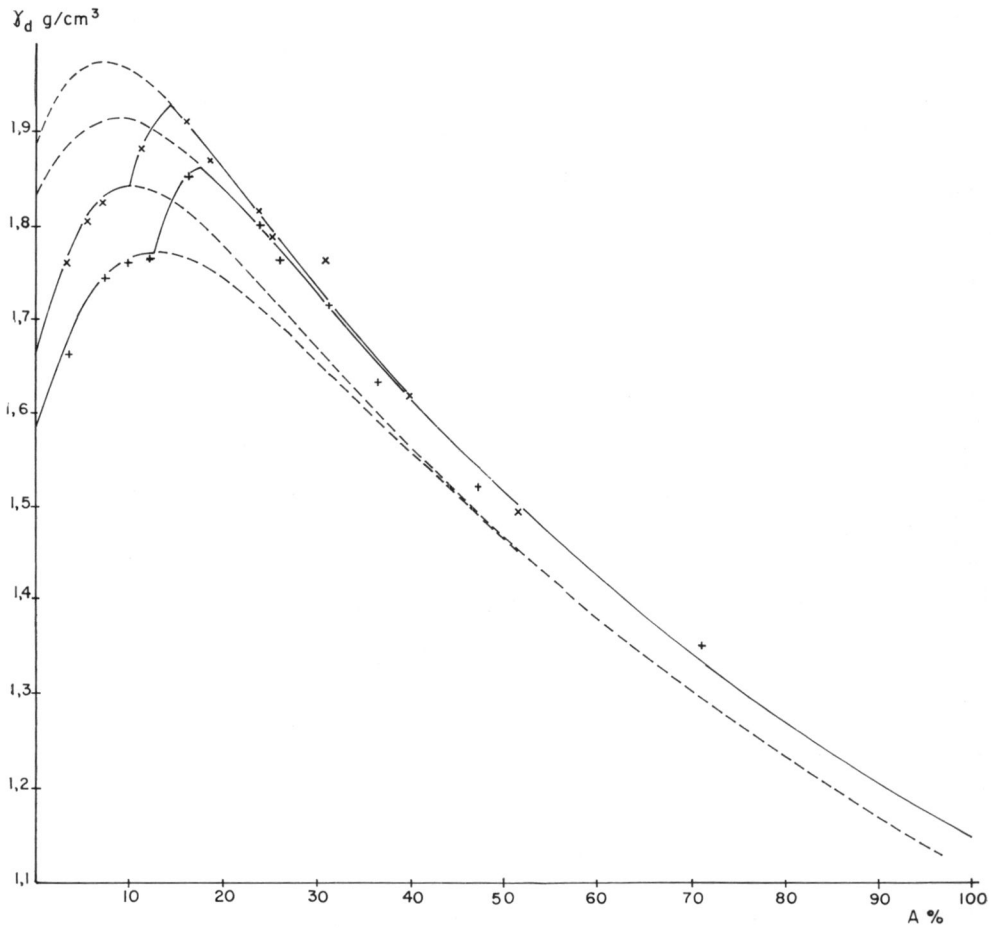



FIG. 3. — *Variations de la densité en fonction de A*

Les points représentent les résultats expérimentaux de
+ la famille FK
× la famille BK
Les courbes sont tracées à partir des considérations théoriques

existe schématiquement trois phases dont la seconde apparaît comme une phase de transition entre les deux autres au cours desquelles les phénomènes présentent des variations continues.

Au cours de la première phase, définie par l'intervalle 0-12 p. 100 environ, nous constatons que le volume U varie très peu et peut être considéré comme constant. La densité apparente $\gamma_d$ accuse un accroissement important alors que le volume d'air résiduel décroît de façon continue. Au cours de cette phase les deux familles ont des individualités marquées par des comportements quantitativement différents liés aux granulométries des squelettes utilisés.

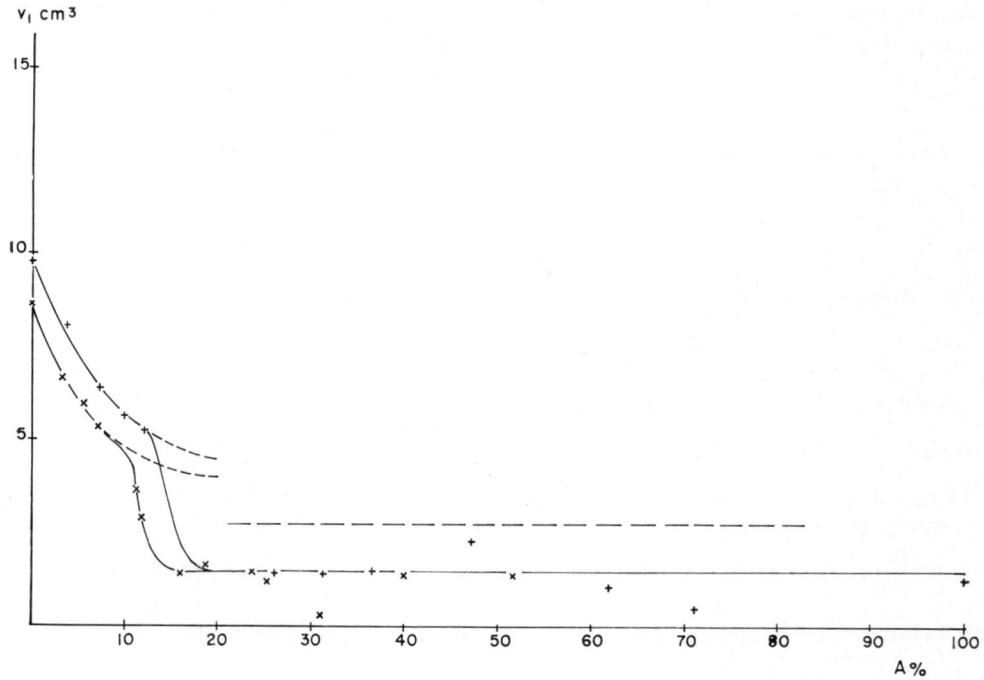



FIG. 4. — *Variations du volume d'air* $v_1$

Les points représentent les résultats expérimentaux de
+ la famille FK
× la famille BK
Les courbes sont tracées à partir des considérations théoriques

La phase de transition, qui se situe entre 12 et 16 p. 100 environ, est caractérisée par une discontinuité des variations de la densité apparente et du volume d'air résiduel. Ces discontinuités sont d'ailleurs plus importantes dans le cas de la famille FK donc dans le cas du squelette le plus fin. Le volume U, qui varie de façon continue, présente alors un accroissement notable lorsque A varie. Mais au cours de cette phase, les deux familles perdent peu à peu leur individualité : les courbes de variations des différentes grandeurs se rapprochent, en effet, les unes des autres montrant ainsi que l'argile a de plus en plus tendance à effacer les effets propres aux squelettes.

La troisième phase, dont l'intervalle d'existence est de 16 p. 100 jusqu'à 100 p.100, est caractérisée par une perte complète des individualités des deux familles. Au cours de cette phase la densité apparente devient une fonction monotone décroissante de la teneur en argile, le volume U semble croître de façon linéaire alors que le volume d'air résiduel semble conserver une valeur constante très faible, de l'ordre de 1,5 cm³ pour un échantillon dont le poids sec est de 100 grammes.

Nous nous proposons d'essayer de donner pour chacune des phases mises en évidence une explication de ces divers comportements et, pour ce faire, nous allons préciser en premier lieu les rôles respectifs de l'eau et de l'argile. Il est donc indispensable d'étudier le gonflement de l'argile et son incidence sur la quantité U en vue de formuler quelques hypothèses qui tenteront d'expliquer les résultats observés, notamment les variations de la densité apparente.

## II. — ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE L'EAU ET DE L'ARGILE

### 1. — *Gonflement de l'argile*

Nous appellerons coefficient de gonflement de l'argile le rapport $g = \frac{Va - V'a}{V'a}$ où $Va$ est le volume apparent humide de $P'a$ grammes d'argile qui occupent, *à l'état sec*, un volume réel égal à $V'a$. Dans la mesure où la quantité d'eau mise en présence de l'argile place celle-ci au-dessus de sa limite de retrait, nous pouvons écrire : $g = \frac{Ve}{V'a}$ car l'augmentation du volume de l'argile est due entièrement à la quantité d'eau adsorbée. Sachant que la teneur en eau d'un échantillon, qui contient $Pe$ grammes d'eau et dont le poids sec est $P't$, s'exprime par le rapport $w = \frac{Pe}{P't}$ 100 et que la densité réelle de l'argile est $d = \frac{P'a}{V'a}$, nous obtenons la relation évidente : $\frac{g}{d} = \frac{w}{A}$ rapport que nous avons déterminé expérimentalement pour tous les échantillons (tabl. 1).

Il nous est possible de préciser dans quelles conditions ce rapport représente le gonflement maximal de l'argile à l'état humide dans un échantillon, c'est-à-dire si $U = v\,A$ est uniquement le volume de l'argile gonflée ou bien le volume d'argile gonflée au maximum et du volume d'eau « libre » qui se trouve dans l'échantillon. Il nous faut donc connaître la valeur du coefficient $g$ lorsque l'argile est gonflée au maximum, c'est-à-dire lorsqu'elle n'augmente plus de volume en présence d'un excès d'eau. FIES a déterminé dans ce cas la densité apparente de l'argile que nous avons utilisée et la valeur obtenue est $(\gamma_d)_a = 1{,}256$ avec $(\gamma_d)_a = \frac{P'a}{Va}$ ;

ainsi :

$$g = \frac{d - (\gamma_d)_a}{(\gamma_d)_a} = \frac{2{,}427 - 1{,}256}{1{,}256} = 0{,}932 \text{ qui entraîne } \frac{g}{d} = 0{,}384.$$

Cette valeur 0,384 représente la valeur de $\frac{g}{d}$ pour l'argile gonflée au maximum.

Puisque expérimentalement $\frac{g}{d}$ est supérieur à 0,384, nous avons mis en évidence le fait qu'une partie de l'eau ne participait pas au gonflement, eau que nous qualifierons d' « excédentaire ».

### 2. — *Conséquences*

*a) Variations expérimentales du volume de l'eau « excédentaire ».*

Une partie $u$ du volume U est le volume de l'argile gonflée ($u = \frac{1 + g}{d}$ A) et l'autre partie $V_1 = U - u$ est le volume de l'eau excédentaire.

Cette quantité d'eau en excès, surtout pour les faibles valeurs de A, peut être

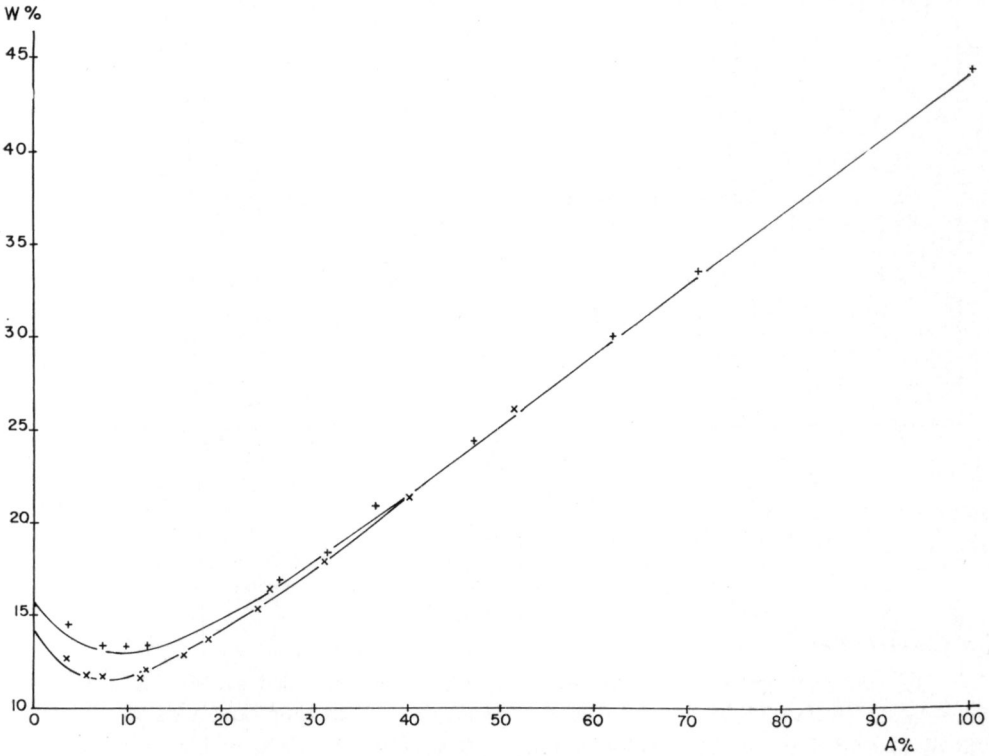



FIG. 5. — *Variations de la teneur en eau W*
Les points représentent les résultats expérimentaux de
+ la famille FK
× la famille BK
Les courbes sont tracées à partir des considérations théoriques

très importante. Par exemple, dans le cas de l'échantillon FK 4, le rapport $\frac{w}{A}$ est égal à 3,890; il y a donc dans cet échantillon : 3,890 — 0,796 = 3,094 cm³ d'eau en excès pour un gramme d'argile.

Cette eau à l'état excédentaire paraît jouer un rôle primordial dans l'arrangement des grains du squelette et nous en avons précisé les variations. A partir du

tableau I qui donne les valeurs expérimentales de $w$, $\frac{g}{d}$ A et de $V_1 = w - \frac{g}{d}$ A, nous avons tracé les courbes de variations de $w$ (fig. 5) et de $V_1$ (fig. 6) pour les deux familles BK et FK. Alors que $w$ passe par une valeur minimale nous constatons que le volume $V_1$ est continuellement une fonction monotone décroissante de la teneur en argile.

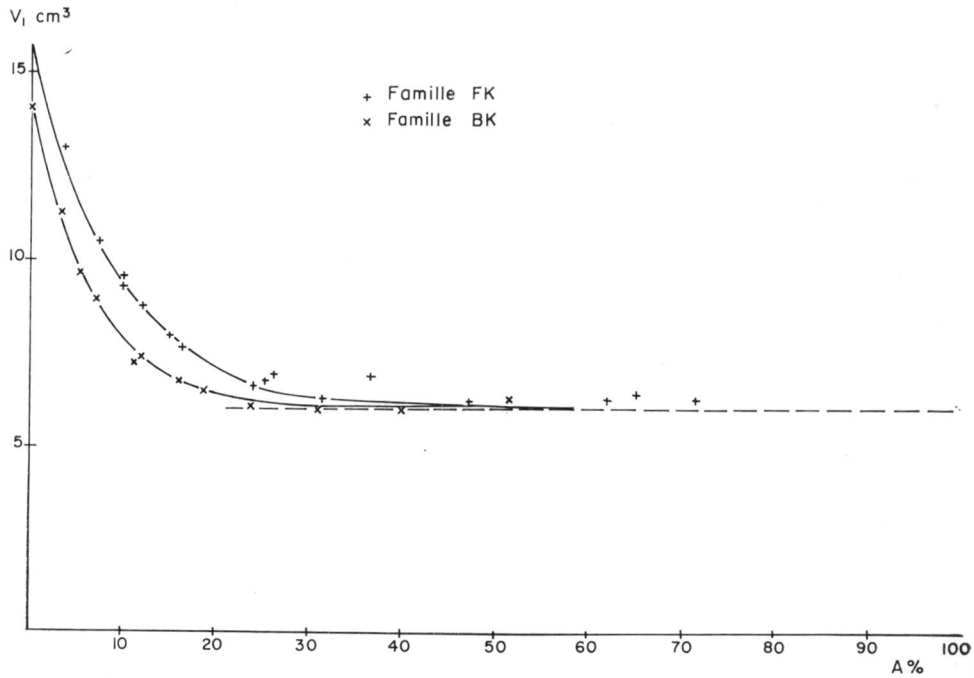



FIG. 6. — *Variations du volume d'eau en excès*

Les points représentent les résultats expérimentaux de
+ la famille FK
× la famille BK
Les courbes sont tracées à partir des considérations théoriques

*b) Lubrification.*

Le compactage entraîne un processus d'arrangement des grains du squelette enrobés d'argile et le volume d'eau « excédentaire » correspondant à l'arrangement le plus serré dans un échantillon donné n'est pas arbitraire. Sa valeur dépend non seulement de certaines caractéristiques des matériaux utilisés (caractéristiques relatives à la forme géométrique et à la répartition granulométrique des grains du squelette) mais également de l'énergie de compactage mise en jeu.

Pour tenter d'expliquer la présence de cette eau qui n'a pas été utilisée pour faire gonfler l'argile, mais qui est présente lorsque l'arrangement des constituants est le plus serré possible, nous avons été amenés à admettre qu'elle était nécessaire pour diminuer au cours du compactage les frottements d'ordre intergranulaires et qu'elle avait eu, de ce fait, un rôle de lubrifiant. Cette eau en excès dans l'échantillon présente donc une aptitude à lubrifier, dont la mesure est ce que nous appellerons potentiel de lubrification L.

L'échantillon compacté au maximum est un réservoir d'eau excédentaire et lorsque nous changeons la teneur en argile d'une quantité $dA$ positive, le potentiel de lubrification L, de cette eau est proportionnel au volume d'eau disponible, mais il est diminué d'une quantité proportionnelle au volume *extrait* de cette réserve pour être absorbé par la quantité d'argile $dA$ *introduite*. Ainsi nous avons l'égalité :

$L = \frac{1}{C} V_1 + \frac{R dV_1}{dA}$ où C et R sont deux constantes positives, $dV_1$ et $dA$ étant, par définition, de signes contraires.

Lorsque l'échantillon dispose de la quantité d'eau excédentaire $V_1$, il est compacté à sa densité maximale et le potentiel de lubrification atteint un seuil $L_o$ qui absorbe une fraction constante K de l'énergie de compactage. Cette énergie cinétique K est la fraction de l'énergie développée directement transmise aux grains du squelette et non absorbée par les effets de parois du moule utilisé. Nous avons alors :

$$L_o = \frac{1}{C} V_1 + \frac{R dV_1}{dA} \qquad (1)$$

Si nous posons $\frac{1}{RC} = \lambda$ et $C L_o = \mu$ cette équation s'écrit :

$$\frac{dV_1}{dA} + \lambda V_1 = \mu$$

L'équation différentielle (1) traduisant les hypothèses de base que nous avons faites évoque une analogie avec un circuit électrique contenant une résistance R et un condensateur de capacité C soumis à une différence de potentiel constante.

Or, dans l'établissement des hypothèses, nous avons considéré que l'échantillon est un réservoir d'eau (au même titre que le condensateur est un réservoir d'électricité) le coefficient R traduisant le fait que l'échantillon présente une certaine résistance à toute variation de $V_1$ lorsque la teneur en argile varie.

Ainsi C apparaît comme étant le volume d'eau excédentaire contenue dans un échantillon qui ne présenterait aucune résistance R et dont le potentiel de lubrification serait égal à l'unité.

Cette similitude des deux phénomènes tend à confirmer *a posteriori* la validité des hypothèses choisies.

*c) Expression analytique du volume d'eau excédentaire.*

En intégrant cette équation qui traduit l'égalité des énergies mises en jeu, nous obtenons la relation entre le volume d'eau $V_1$ et la teneur en argile A, et il vient :

$V_1 = k\, e^{-\lambda A} + \mu$ où $k$ est une constante d'intégration. L'expression de la dérivée de $V_1$ apporte un complément d'information sur le signe de cette constante. Nous avons :

$\frac{d V_1}{d A} = - k\lambda\, e^{-\lambda A}$ ; or nous avons constaté qu'une variation positive de la teneur en argile $dA$ entraîne une diminution de la quantité d'eau disponible dans la « réserve » ; il faut donc nécessairement que cette dérivée soit négative, ce qui entraîne $k$ positif, $\lambda$ étant positif par essence même.

### 3. — *Application numérique*

Pour déterminer les valeurs numériques des paramètres $k$, $\lambda$ et $\mu$, nous avons utilisé :

1° Les résultats expérimentaux de $B_0$ et de $F_0$. Lorsque $A = 0$, nous avons en effet : $(V_1)_0 = k + \mu$ qui représente le volume d'eau en excès dans les squelettes compactés au maximum.

2° La figure 6 qui permet de déterminer :

*a*) la tangente à l'origine de la courbe de variations dont le cœfficient directeur est $\left(\frac{dV_1}{dA}\right)_0 = -k\lambda$ ;

*b*) l'ordonnée de l'asymptote à la courbe qui détermine, lorsque A augmente indéfiniment $\mu = (V_1)_\infty$.

D'où les résultats :

| Éch. | $\mu$ | $k$ | $\lambda$ | Équations |
|---|---|---|---|---|
| FK | 6 | 9,8 | 0,111 | $V_1 = 9{,}8\ e^{-0{,}111\,A} + 6$ |
| BK | 6 | 8,1 | 0,149 | $V_1 = 8{,}1\ e^{-0{,}149\,A} + 6$ |

Les courbes représentatives de ces équations ont été tracées sur la figure 6 à l'aide des valeurs précédemment calculées. (Les détails des calculs sont donnés dans le tableau 2). Elles nous permettent de constater que les hypothèses faites sont en accord assez étroit avec les résultats expérimentaux obtenus.

TABLEAU 2

*Valeurs calculées des volumes $V_1$, $w$ et $U$ pour les deux familles*

| | Famille FK | | | Famille BK | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | $V_1$ | $w$ | U | $V_1$ | $w$ | U |
| 0 | 15,8 | 15,8 | 15,8 | 14,1 | 14,1 | 14,1 |
| 5 | 11,61 | 13,53 | 15,59 | 9,84 | 11,79 | 13,85 |
| 10 | 9,25 | 13,05 | 17,17 | 7,82 | 11,66 | 15,78 |
| 15 | 7,86 | 13,62 | 19,80 | 6,86 | 12,62 | 18,80 |
| 20 | 7,07 | 14,73 | 22,97 | 6,41 | 14,08 | 22,32 |
| 30 | 6,35 | 17,87 | 30,22 | 6,09 | 17,61 | 29,96 |
| 50 | 6,10 | 25,20 | 45,80 | 6,03 | 25,20 | 45,80 |
| 70 | $\simeq$ 6,03 | 32,90 | 61,70 | $\simeq$ 6,0 | 32,90 | 61,70 |
| 100 | $\simeq$ 6,0 | 44,40 | 85,60 | $\simeq$ 6,0 | 44,40 | 85,60 |
| $\infty$ | = 6,0 | — | — | = 6,0 | — | — |

*a*) *Expression analytique de la teneur en eau.*

Il est maintenant possible d'obtenir l'équation donnant les variations de la teneur en eau pondérale $w$ qui est liée au volume d'eau excédentaire par la relation :

$$w = V_1 + \frac{g}{d} A$$

Remplaçons $V_1$ par l'expression obtenue précédemment, il vient :

$$w = k\, e^{-\lambda A} + \frac{g}{d} A + \mu$$

Les résultats expérimentaux ont fait apparaître l'existence d'une valeur minimale de $w$. Cette valeur minimale est définie analytiquement par $\frac{dw}{dA} = 0$, c'est-à-dire :

$$- k\lambda\, e^{-\lambda A} + \frac{g}{d} = 0$$

Cette égalité est *a priori* possible car nous savons que $k\lambda$ est positif.
Nous obtenons :

$$A_1 = \frac{1}{\lambda} \operatorname{Log} \frac{d}{g} k\lambda \qquad (2)$$

Pour que la valeur obtenue puisse avoir une signification physique, il est nécessaire que la quantité $\frac{d}{g} k\lambda$ soit supérieure à l'unité.

Les quantités $d$, $g$, $k$ et $\lambda$ sont des caractéristiques des familles de mélanges binaires squelette-argile, donc le rapport $k\lambda \frac{d}{g}$ est une valeur spécifique de chaque famille. Il n'est pas évident que toutes les familles répondent à la condition $k \frac{d}{g} \lambda > 1$. Il est ainsi permis de penser qu'il existe des familles (celles dans lesquelles l'argile est très « gonflante » par exemple) telles que la teneur en eau ne passe pas par une valeur minimale.

Il est donc possible, dans l'immédiat, d'affirmer que si l'argile est peu gonflante, comme dans le cas étudié, la teneur en eau passe par une valeur minimale qu'il est possible de déterminer en connaissant les caractéristiques des mélanges. Il apparaît important de préciser les conditions d'existence de ce minimum, ce qu'il nous est impossible d'effectuer dans le cadre de cette étude.

— *Expression numérique de la teneur en eau.*

Les valeurs numériques des coefficients ont été précédemment déterminées (paragraphe 3) à partir de considérations géométriques sur le graphique représentant les variations de $V_1$. Nous obtenons donc directement :

Pour la famille FK $\quad w = 9{,}8\, e^{-0{,}111\, A} + 0{,}384\, A + 6$

Pour la famille BK $\quad w = 8{,}1\, e^{-0{,}149\, A} + 0{,}384\, A + 6$

Les courbes représentatives des variations de $w$ ont été tracées sur la figure 5 et nous permettent de comparer les résultats expérimentaux aux résultats obtenus à partir de l'équation différentielle traduisant les hypothèses de base. Ici encore, les résultats témoignent d'un très bon accord (tabl. 2).

Les valeurs numériques des teneurs en argile pour les minimums de la teneur en eau sont alors :

pour la famille FK : $A_1 = 9{,}4$ p. 100 qui entraîne : $w = 13{,}05$ p. 100,

pour la famille BK : $A_1 = 7{,}7$ p. 100 qui entraîne : $w = 11{,}54$ p. 100

*b) Expression analytique du volume occupé par l'eau et l'argile gonflée.*

Au cours de l'observation des résultats nous avons constaté que le volume U contribuait à définir trois phases distinctes dans le comportement des mélanges. A l'aide des résultats théoriques précédemment établis nous allons préciser ces variations et mettre en évidence les conditions d'existence des résultats obtenus.

Ce volume est défini par l'expression $U = w + \frac{A}{d}$, ainsi :

$$U = k\, e^{-\lambda A} + \frac{1 + g}{d} A + \mu$$

Nous avons constaté expérimentalement que pour de faibles valeurs de A ce volume était à peu près constant. Dans de telles conditions, la courbe représentative de ses variations passe par un extrémum très étalé, défini par l'égalité $\frac{dU}{dA} = 0$.

Lorsque cette équation est satisfaite, nous obtenons la relation :

$$\frac{dU}{dA} = -k\, e^{-\lambda A} + \frac{1 + g}{d} = 0 \quad \text{qui entraîne :}$$

$$A_2 = \frac{1}{\lambda} \operatorname{Log} \frac{\lambda\, kd}{1 + g} \qquad (3)$$

Ce résultat ne peut avoir de signification physique que si la quantité $\frac{\lambda kd}{1 + g}$ est supérieure à 1. Cette condition est une restriction supplémentaire imposée au gonflement, donc aux caractéristiques du mélange binaire.

## 4. — *Résultats numériques*

En remplaçant les coefficients par leurs valeurs numériques nous obtenons les relations suivantes :

pour la famille FK : $U = 9{,}8\, e^{-0{,}111\, A} + 0{,}796\, A + 6$

pour la famille BK : $U = 8{,}1\, e^{-0{,}149\, A} + 0{,}796\, A + 6$

Les courbes représentatives des variations de U ont été tracées sur la figure 2 à l'aide des résultats numériques calculées au tableau 2.

La résolution de l'équation (3) donne les valeurs numériques suivantes :

famille FK : $A_2 = 2{,}8$ p. 100 et famille BK : $A_2 = 2{,}8$ p. 100

Rien ne permet dans la théorie de considérer ces deux valeurs comme égales.

Enfin le tableau 3 précise les valeurs numériques de U pour les faibles valeurs de A (A inférieur à 10 p. 100).

Nous retrouvons les résultats annoncés au moment de l'observation des résultats expérimentaux : pour A inférieur à 8 p. 100 environ, le volume eau + argile peut être considéré comme constant.

— *Remarque*

Une première condition concernant le gonflement a été précédemment mentionnée (paragraphe 3 *a*). Nous avions en effet comme valeur critique pour le gonflement une valeur $g$ telle que $\lambda k > \frac{g}{d}$. Pour un squelette donné, il semble donc qu'il y ait

TABLEAU 3

| A | 0 | 2 | 3 | 4 | 6 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| U de FK | 15,8 | 15,42 | 15,42 | 15,46 | 15,82 | 17,17 |
| U de BK | 14,1 | 13,50 | 13,50 | 13,64 | 14,09 | 15,78 |

trois types d'argile :

1° *Argiles « peu gonflantes »*. Ce sont des argiles dont le gonflement est tel que la relation $\frac{g}{d} < \lambda k - \frac{1}{d}$ soit satisfaisante. Le volume U ainsi que la teneur en eau (dans un échantillon dont le poids sec est de 100 grammes), au maximum Proctor des mélanges effectués avec cette argile, passent par une valeur minimale lorsque A varie de 0 à 100 p. 100.

2° *Argiles « gonflantes »*. Ce sont celles dont le gonflement vérifie la double inégalité $k\lambda - \frac{1}{d} < \frac{g}{d} < k\lambda$. Pour ces argiles, seule la teneur en eau de l'échantillon passe par une valeur minimale, alors que le volume U est une fonction monotone de A.

3° *Argiles « très gonflantes »*. Caractérisées par la relation $\frac{g}{d} > \lambda k$. Dans ce dernier cas, les deux volumes considérés (U et $w$) sont deux fonctions monotones de A.

Il nous est impossible dans le cadre de cette étude de préciser les caractéristiques à l'échelle microscopique de ces différentes argiles par manque d'informations sur les comportements vis-à-vis de l'eau des argiles d'un autre type. Mais, maintenant, apparaît la nécessité d'effectuer des études semblables à celle faite ici avec la kaolinite, sur des illites ou des montmorillonites. A l'aide de ces argiles, nous pouvons observer un gonflement maximal plus important et par elles, il nous serait possible de confirmer ou d'infirmer les résultats présentés avec prudence dans cet article.

## 5. — *Conclusions*

Tous les résultats obtenus s'accordent bien avec la théorie évoquée. Les écarts entre les résultats numériques expérimentaux et ceux calculés à partir de cette théorie sont suffisamment faibles pour pouvoir considérer que la théorie avancée est une image à peu près fidèle du comportement de l'argile gonflée et de l'eau en « excès » dans l'échantillon.

Maintenant que ces comportements ont été précisés, il nous est possible d'étudier les conséquences qu'ils entraînent sur l'arrangement des grains du squelette.

## III. — ÉTUDE DE LA COMPACITÉ

Les trois phases mises en évidence sont principalement caractérisées par des variations du volume d'air résiduel qui obéissent à des lois différentes. Le comportement de l'eau et de l'argile ne subit aucune discontinuité, comme nous venons de le voir, et seules les variations de $v_1$ permettent d'expliquer le processus d'arrangement des grains du squelette.

La figure 7 représente les variations du volume occupé par le squelette dans un échantillon dont le volume à l'état humide est de 100 cm³. Ce graphique, comparé à celui donnant les variations de $v_1$ permet de lier l'influence de $v_1$ sur l'arrangement des grains du squelette.

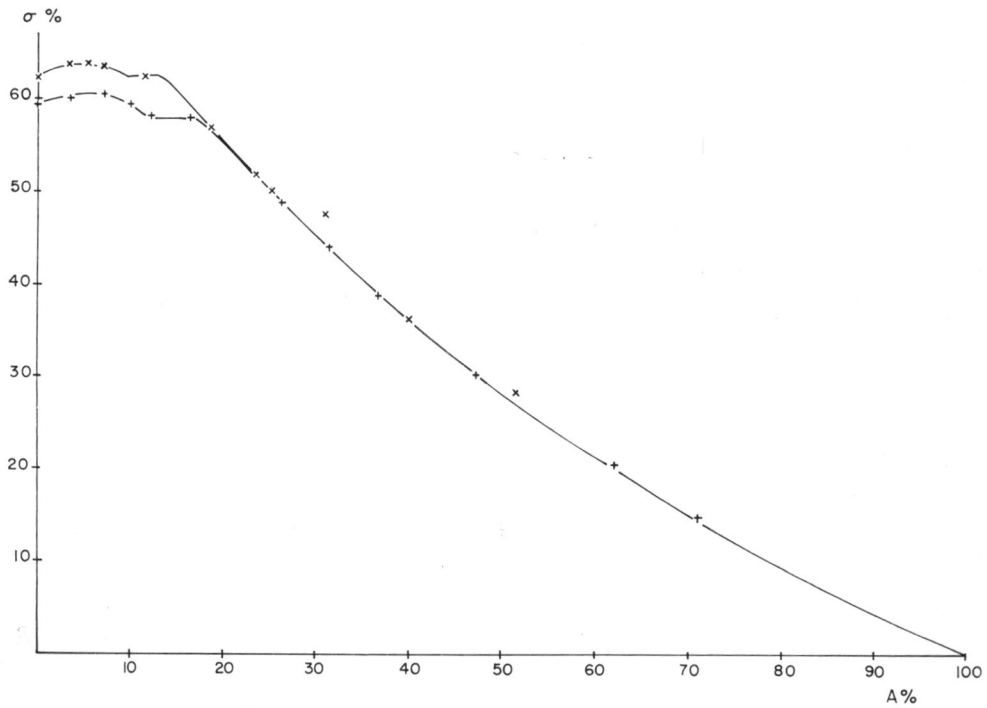



FIG. 7. — *Variations du volume occupé par le squelette dans 100 cm³ d'échantillon*
\+ la famille FK
× la famille BK

### 1. — *Étude de la première phase*

*a) Variations du volume d'air résiduel.*

C'est au cours de cette première phase que la quantité d'eau en excès est la plus importante alors que les quantités d'argile en présence dans l'échantillon sont

les plus faibles. On peut admettre que l'argile est en quantité insuffisante pour avoir une quelconque action lubrifiante et que l'eau en excès est la seule à pouvoir intervenir. Les faibles variations du volume du squelette conduisent à penser qu'au cours de cette phase les grains sont au contact les uns des autres, l'argile gonflée étant chassée dans la porosité matricielle sans perturber l'architecture des grains du squelette établie par le compactage. Ainsi nous pouvons admettre que le volume d'air résiduel est soumis aux variations de l'eau en excès par la relation, $v_1 = BV_1$ relation qui peut s'écrire :

$$v_1 = k'e^{-\lambda A} + \mu' \qquad (4)$$

La valeur de $\mu'$ est celle qu'aurait le volume de l'air résiduel lorsque A augmente indéfiniment si l'eau seule était lubrifiante dans tous les mélanges, sans aucune intervention lubrifiante de l'argile.

— *Résultats numériques.*

Les résultats expérimentaux nous permettent de calculer B et d'en déduire les valeurs des constantes $k'$ et $\mu'$ : pour déterminer la valeur de B nous avons considéré les valeurs des volumes pour A = 0. Nous obtenons :

| | B | $\mu'$ | $k'$ | $v_1$ |
|---|---|---|---|---|
| FK | 0,625 | 3,75 | 6,13 | $v_1 = 6{,}13\ e^{-0{,}111A} + 3{,}75$ |
| BK | 0,617 | 3,70 | 5,0 | $v_1 = 5{,}0\ e^{-0{,}149A} + 3{,}70$ |

A partir de ces relations numériques, nous avons calculé les valeurs théoriques du volume de l'air résiduel (tabl. 4) et les courbes correspondantes ont été tracées sur la figure 6. Les courbes sont en accord avec les résultats expérimentaux dans le cadre de la première phase avec des incertitudes sur les mesures presque négligeables.

TABLEAU 4

*Valeurs calculées de $V_1$, $v_1$ et $\gamma_d$ dans le cadre de la phase I*
(lubrification par l'eau seule)

| | Famille FK | | | Famille BK | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | $V_1$ | $v_1$ | $\gamma d$ | $V_1$ | $v_1$ | $\gamma d$ |
| 0 | 15,8 | 9,88 | 1,583 | 14,1 | 8,7 | 1,660 |
| 5 | 11,61 | 7,25 | 1,710 | 9,84 | 6,07 | 1,802 |
| 10 | 9,25 | 5,78 | 1,762 | 7,82 | 4,83 | 1,841 |
| $A_3$ | 8,34 | 5,22 | 1,772 | 7,74 | 4,78 | 1,841 |
| 15 | 7,86 | 4,91 | 1,766 | 6,86 | 4,24 | 1,822 |
| 20 | 7,07 | 4,42 | 1,744 | 6,41 | 3,96 | 1,779 |
| 30 | 6,35 | 3,97 | 1,656 | 6,09 | 3,75 | 1,670 |
| 50 | 6,10 | 3,80 | 1,463 | 6,03 | 3,73 | 1,465 |
| 70 | 6 | 3,75 | 1,303 | 6 | 3,70 | 1,304 |
| 100 | 6 | 3,75 | 1,120 | 6 | 3,70 | 1,121 |

Comme la constante $\mu'$ représente la valeur du volume d'air résiduel lorsque l'échantillon ne contient que de l'argile (en fait lorsque la teneur en argile est infiniment grande) les deux courbes représentatives ont théoriquement la même asymptote ce qui entraîne que la constante $\mu'$ est une caractéristique de la nature de l'argile.

*b) Variations de la densité apparente.*

Nous avons étudié jusqu'à présent les variations des volumes de quelques constituants d'un échantillon dont le poids sec est de 100 grammes. Or, cet échantillon occupe un volume apparent de $\frac{100}{\gamma_d}$ cm³ qui est la somme des volumes occupés par les fractions squelette, eau totale, argile non gonflée et air résiduel. Nous avons donc :

$$\frac{100}{\gamma_d} = \frac{100 - A}{G} + \frac{A}{d} + w + v_1 \qquad (5)$$

avec $$\frac{A}{d} + w = \frac{1 + g}{d} A + V_1$$

Mais nous avons établi les relations suivantes : $V_1 = ke^{-\lambda A} + \mu$ et $v_1 = BV_1$. L'égalité entre les volumes devient donc :

$$\frac{100}{\gamma_d} = \frac{100 - A}{G} + \frac{1 + g}{d} A + (B + 1)V_1$$

qui définit les variations de $\gamma_d$. Pour simplifier l'écriture de cette relation, posons $\beta = \frac{1 + g}{d} - \frac{1}{G}$ ; il vient :

$$\gamma_d = \frac{100}{\frac{100}{G} + \beta A + (B + 1)V_1} = \frac{100}{F(A)}$$

Le sens de variation de cette fonction et l'existence des valeurs extrémales sont déterminées à l'aide de la dérivée. Il vient :

$$\frac{d\gamma_d}{dA} = -100 \frac{F'(A)}{F(A)^2} \qquad \text{où } F'(A) = \beta - k\lambda (B + 1)e^{-\lambda A}$$

Il conviendrait donc d'étudier le signe de $F'(A) = -k\lambda (B + 1)e^{-\lambda A} + \beta$. Du point de vue strictement théorique nous pouvons considérer comme possible l'existence de mélanges binaires dont les caractéristiques seraient telles que $F'(A)$ soit toujours positif, donnant à la dérivée de $\gamma_d$ une valeur toujours négative. Les mélanges auraient alors des densités apparentes toujours décroissantes lorsque la teneur en argile augmente.

Dans le cas où cette dérivée a un signe variable, la valeur de la teneur en argile pour laquelle la densité passe par une valeur extrémale est définie par la relation : $F'(A) = 0$. Nous ne pouvons discuter tous les cas théoriques possibles de variations de la densité apparente par manque d'information concernant la signification physique des divers paramètres mis en jeu. Afin de mieux les lier aux caractéristiques des mélanges, il serait nécessaire de posséder un échantillonnage plus complet.

Nous limiterons notre étude aux cas particuliers des deux mélanges FK et BK

car la discussion théorique de tous les cas possibles ne peut s'appuyer uniquement sur deux exemples expérimentaux.

La densité apparente passe par une valeur extrémale pour une valeur de A satisfaisant la relation :

$$k\lambda(B + 1)e^{-\lambda A} - \beta = 0$$

ce qui entraîne :

$$A_3 = \frac{1}{\lambda} \operatorname{Log} \frac{\lambda k}{\beta} (B + 1)$$

— *Résultats numériques.*

Pour les deux familles de mélanges étudiés, nous avons :

$$\beta = \frac{1 + g}{d} - \frac{1}{G} = 0{,}796 - 0{,}375 = 0{,}421$$

*Famille FK.* — En remplaçant les paramètres par leurs valeurs numériques, nous avons :

$$F'(A) = -(1{,}768\ e^{-0{,}111\,A} - 0{,}421)$$

Cette dérivée s'annule pour $A_3 = 12{,}89$ p. 100, elle est positive lorsque A est inférieur à $A_3$ et est négative pour les valeurs supérieures à $A_3$ ; ainsi, au cours de la première phase, la densité est une fonction croissante de la teneur en argile.

L'expression numérique est dans ce cas :

$$\gamma_d = \frac{100}{37{,}45 + 0{,}421\,A + 1{,}625\,V_1} \qquad (6)$$

avec $V_1 = 9{,}8\ e^{-0{,}111\,A} + 6$

*Famille BK.* — Pour cette famille, l'expression de F' (A) est :

$$F'(A) = -(1{,}951\ e^{-0{,}149\,A} - 0{,}421)$$

Cette dérivée s'annule pour $A_3 = 10{,}3$ p. 100 et comme précédemment, elle est positive pour les valeurs de A inférieures à $A_3$ et négative pour les valeurs supérieures. Ainsi, au cours de cette première phase, la densité apparente est également une fonction croissante.

L'expression numérique de la densité apparente est :

$$\gamma_d = \frac{100}{37{,}45 + 0{,}421\,A + 1{,}617\,V_1} \qquad (7)$$

avec $V_1 = 8{,}1\ e^{-0{,}149\,A} + 6$.

Les équations (6) et (7) nous ont permis de tracer les courbes théoriques (fig. 3) afin de pouvoir les comparer aux tracés expérimentaux. Le détail des calculs étant précisé au tableau 4.

Les deux courbes totales obtenues représentent les variations de la densité apparente des mélanges binaires en considérant le cas théorique où l'argile n'est pas lubrifiante, l'arrangement des agrégats se faisant sous la seule action combinée de l'énergie de compactage et de la lubrification due à l'eau en excès. Mais ces courbes ne traduisent le comportement réel des mélanges que pendant la première phase avant que l'argile ne soit en quantité suffisante pour avoir une action lubrifiante.

2. — *Étude de la deuxième phase* (phase intermédiaire)

Cette phase intermédiaire est caractérisée par une discontinuité dans les variations du volume d'air résiduel. Si la première phase est soumise à la loi de lubrification de l'eau excédentaire, il existe une valeur limite de la teneur en argile au-delà de laquelle le potentiel de lubrification devient insuffisant pour permettre l'arrangement maximal d'une matière discontinue dont l'encombrement est devenu trop important. Au-delà de cette valeur limite, l'arrangement ne peut être maximal sous la seule action lubrifiante de l'eau en excès. Nous pouvons donc considérer que cette valeur limite est $A_3$, valeur pour laquelle la densité apparente passe par un maximum lorsqu'elle est soumise à la loi de lubrification de l'eau excédentaire, et qu'elle définit la limite entre la première et la deuxième phase.

Au cours de cette deuxième phase l'argile occupe un volume suffisant pour que sa propre action lubrifiante se superpose à celle de l'eau. Le potentiel de lubrification ainsi créé est directement proportionnel à la teneur en argile de l'échantillon et il absorbe une fraction de plus en plus grande de l'énergie développée au cours du compactage, corrélativement à la diminution des frottements sur la paroi du moule.

Il existe cependant une valeur limite $A_4$ de la teneur en argile pour laquelle l'énergie dissipée par frottements atteint une valeur minimale, nécessairement non nulle, qu'elle gardera pour des valeurs supérieures de A. Cette valeur $A_4$ définit la limite entre la deuxième et la troisième phase.

Puisqu'il y a proportionnalité entre le potentiel de lubrification et la quantité d'argile mise en jeu nous pouvons admettre que le volume d'air résiduel suit la même loi de proportionnalité, et plus précisément, qu'un apport d'un certain volume d'argile gonflée entraîne une diminution de même amplitude du volume d'air résiduel. Nous pouvons donc écrire :

$$v_1 = -\frac{1 + g}{d} A + b$$

où $b$ est une constante qu'il est possible de déterminer à partir des conditions limites de la première phase.

— *Remarque.*

La figure 7 nous permet de constater que pendant cette deuxième phase le volume occupé par le squelette ne varie pas. Ainsi, la lubrification de l'argile a pour conséquence immédiate de ne remplir que la porosité matricielle déjà existante. Cependant comme les échantillons ont, lorsque la teneur en argile augmente, de moins en moins de squelette, le rôle lubrifiant de l'argile se traduit par une augmentation de la quantité de matière dans un volume donné.

*a*) *Variations de la densité apparente.*

Si nous appliquons à l'équation (5) la relation précédente dans le cadre de cette deuxième phase, nous obtenons :

$$\gamma_d = \frac{100}{\frac{100}{G} + \beta A + V_1 + v_1}$$

avec $V_1 = k\ e^{-\lambda A} + \mu$ et $v_1 = -\frac{1+g}{d} A + b.$

Il vient : $$\gamma_a = \frac{100}{\frac{100}{G} + b - \frac{A}{G} + V_1} \tag{8}$$

*Remarque.*

Il nous est impossible de justifier la valeur théorique de la constante $b$, mais nous pouvons considérer qu'elle est liée à la valeur de $A_3$ dont nous connaissons l'expression littérale et où figurent des paramètres dont la nature est encore mal définie.

*b) Résultats numériques.*

Au cours de l'explication théorique, nous avons considéré que l'encombrement des particules solides devenait trop important pour que l'eau excédentaire puisse assumer son rôle de lubrifiant. Nous allons quantifier cet encombrement sur les deux exemples de mélanges choisis pour cette étude.

Le volume d'argile gonflée contenue dans un échantillon dont le poids sec est de 100 grammes est alors $\frac{1+g}{d} A_3$. En ce même point, le volume occupé par le squelette est $\frac{100 - A_3}{G}$ alors que ces 100 grammes occupent un volume de $\frac{100}{\gamma_a}$ cm³ où $\gamma_a$ est la valeur de la densité de l'échantillon qui a $A_3$ p. 100 de teneur en argile. Nous appellerons $a$ le rapport du volume occupé par l'argile gonflée et le squelette sur le volume total de l'échantillon. Il vient :

| | Famille FK | Famille BK |
|---|---|---|
| $V_A = \frac{1+g}{d} A_3$ cm³ | 10,25 | 8,20 |
| $\frac{100 - A_3}{G}$ cm³ | 32,65 | 33,60 |
| Volume de l'éch. cm³ | 56,43 | 54,30 |
| $\frac{V_A}{V_T}$ % | 18,2 | 15,1 |
| $a$ % | 76 | 77 |

L'égalité apparente du rapport a, dans les deux cas, conduit à penser qu'il s'agit bien d'une limite d'encombrement que le potentiel de lubrification de l'eau excédentaire ne peut dépasser. Cet encombrement limite ne peut être augmenté qu'avec l'aide du potentiel de lubrification de l'argile.

En exprimant que la deuxième phase commence lorsque la teneur en argile est égale à $A_1$, nous pouvons calculer numériquement la valeur de $b$. De ce fait, la loi de variations du volume d'air résiduel s'écrit :

pour la famille FK : $v_1 = -0{,}796\,A + 15{,}49$ ; (9)

pour la famille BK : $v_1 = -0{,}796\,A + 12{,}98$.

A l'aide de ces résultats numériques, il nous est possible d'expliciter l'équation (8) pour chaque famille. Il vient :

pour la famille FK : $$\gamma_d = \frac{100}{52{,}94 - 0{,}375A + V_1}$$

pour la famille BK : $$\gamma_d = \frac{100}{50{,}43 - 0{,}375\ A + V_1}$$

les variations de $V_1$ sont données par les mêmes équations que dans la première phase.

Nous ne donnons pas les détails des calculs permettant de tracer les courbes représentatives des variations de la densité apparente, mais la figure 3 permet de constater que pour cette phase, les résultats théoriques sont en accord avec les points expérimentaux.

La limite supérieure de cette phase est atteinte lorsque le volume d'air résiduel a atteint sa valeur minimale qui est donnée expérimentalement $v_1 = 1{,}5$ (fig. 4 et tabl. 1). La limite $A_4$ définie précédemment est calculée numériquement en portant dans les équations (9) $v_1 = 1{,}5$ ; il vient :

pour la famille FK : $A_4 = 17{,}6$ p. 100 et pour la famille BK : $A_4 = 14{,}4$ p. 100.

### 3. — *Étude de la troisième phase*

*a) Variations du volume d'air résiduel.*

Cette troisième phase est amorcée lorsque le potentiel de lubrification de l'argile équilibre l'énergie de compactage développée, les frottements sur les parois étant réduits au minimum. Ainsi au cours de cette phase, le potentiel utilisable est toujours constant et le volume d'air résiduel a atteint sa valeur minimale. Les résultats expérimentaux apportent une confirmation supplémentaire aux hypothèses énoncées.

*b) Variations de la densité apparente.*

La relation théorique (5) entre la densité apparente et les volumes des divers constituants reste de toute évidence encore valable, mais au cours de cette phase nous avons $v_1 =$ constante. Il vient :

$$\gamma_d = \frac{100}{\frac{100}{G} + A + V_1 + v_1} = \frac{100}{G(A)} \qquad (10)$$

Comme dans le cas de la première phase, nous ne nous étendrons pas sur tous les cas théoriques possibles. Nous préciserons seulement que $\gamma_d$ passe par une valeur maximale théorique pour une valeur $A_5$ de la teneur en argile satisfaisant la relation $G'(A) = 0$, ce qui entraîne :

$$A_5 = \frac{1}{\lambda} \operatorname{Log} \frac{\lambda k}{\beta}$$

— *Résultats numériques.*

En remplaçant les coefficients par leurs valeurs numériques, nous obtenons :

| | $A_5$ | $V_1$ | $\gamma d$ |
|---|---|---|---|
| | (%) | | |
| Famille FK | 8,8 | $V_1 = 9{,}8\ e^{-3{,}111\ A} + 6$ | $\gamma_d = \dfrac{100}{38{,}95 + 0{,}421\ A + V_1}$ |
| Famille BK | 7,1 | $V_1 = 8{,}1\ e^{-3{,}149\ A} + 6$ | $\gamma_d = \dfrac{100}{38{,}95 + 0{,}421\ A + V_1}$ |

Les détails des calculs sont donnés par le tableau 5 et les courbes correspondantes ont été tracées sur la figure 3.

TABLEAU 5

*Variations de la densité apparente dans les hypothèses de la troisième phase*

| | Famille FK | | Famille BK | |
|---|---|---|---|---|
| A | $A_i$ | $\gamma_d$ | $A_i$ | $\gamma_d$ |
| 0 | | 1,828 | | 1,884 |
| 5 | | 1,898 | | 1,965 |
| $A_5$ | 8,8 | 1,912 | 7,1 | 1,971 |
| 10 | | 1,910 | | 1,964 |
| $A_4$ | 17,6 | 1,860 | 14,4 | 1,926 |
| 20 | | 1,839 | | 1,859 |
| 30 | | 1,726 | | 1,734 |
| 50 | | 1,516 | | 1,517 |
| 70 | | 1,342 | | 1,342 |
| 100 | | 1,149 | | 1,149 |

Nous constatons que la valeur de $A_5$ est en dehors de l'intervalle de la troisième phase et reste une valeur théorique. Mais si nous considérons les courbes complètes, elles représentent les variations de la densité apparente dans le cas théorique où l'action lubrifiante de l'argile s'ajoute à celle de l'eau excédentaire même pour de faibles quantités d'argile dans l'échantillon.

Dans l'intervalle définissant la troisième phase, les résultats donnés par ces équations sont en très bon accord avec les résultats expérimentaux, ce qui nous permet de considérer les hypothèses énoncées comme étant une bonne approche de la compréhension des phénomènes créés par le compactage.

## CONCLUSION

A l'aide de deux familles de mélanges binaires dans lesquels nous avons fait varier les proportions des constituants, nous avons tenté de faire ressortir l'action de l'argile sur la compacité, l'énergie utilisée étant constante.

Grâce à des mesures concernant les quantités d'eau nécessaires pour que le matériau soit compacté au maximum, nous avons été amenés à définir la fonction « potentiel de lubrification » de l'eau ou de l'argile en introduisant la notion d'eau excédentaire. En effet, pour expliquer la présence dans l'échantillon compacté à son maximum de densité apparente d'une quantité d'eau n'ayant pas servi à gonfler l'argile, nous avons considéré qu'une partie de l'énergie de compactage était absorbée par cette eau excédentaire qui facilitait, par lubrification, l'arrangement des grains. A l'aide d'hypothèses simples donnant à la porosité matricielle un rôle de réservoir, nous avons écrit la loi de variations du volume de cette eau excédentaire dont les résultats expérimentaux confirment la validité.

Cette loi nous a permis de faire ressortir les différences possibles dans les comportements de la teneur en eau et de la teneur en « lubrifiant » (eau plus argile) selon certaines caractéristiques du complexe squelette-argile. Ces caractéristiques font intervenir le gonflement de l'argile utilisée ainsi que, selon toute vraisemblance, la répartition granulométrique du squelette lui-même et la forme géométrique de ses grains. Il conviendrait de pouvoir préciser l'influence de ces paramètres géométriques et granulométriques, mais une telle tentative dépasse les limites d'investigations de cette étude.

Nous avons constaté expérimentalement que les variations du volume d'air résiduel se font en trois phases bien typées.

*Au cours de la première phase,* compte tenu des faibles teneurs en argile des échantillons, nous avons considéré que seule l'eau en excès imposait sa loi de lubrification. Cette affirmation s'appuie en outre sur le fait que les volumes d'air résiduel sont proportionnels aux volumes d'eau excédentaire correspondants. Ces hypothèses, basées sur des faits expérimentaux dont les mesures sont très satisfaisantes, nous ont alors permis d'expliciter les variations de la densité apparente. Cependant, le potentiel de lubrification de cette eau a une valeur limitée et il devient insuffisant pour arranger le plus étroitement possible une masse de sol dans laquelle le volume occupé par la fraction argile gonflée devient important.

Lorsque l'eau en excès ne peut plus imposer sa loi de variations au volume d'air résiduel, le comportement des échantillons entre *dans la deuxième phase.* A la lubrification due à l'eau s'ajoute maintenant celle due à l'argile dont le potentiel utilisable est une fonction croissante de A, c'est-à-dire du volume d'argile gonflée. Les résultats expérimentaux nous ont conduits à penser que pour une augmentation $dV_A$ du volume d'argile gonflée correspond une diminution $dv_1 = - dV_A$ du volume d'air résiduel. Cette deuxième phase est donc caractérisée par l'argile qui impose sa loi de lubrification à potentiel variable. Ce potentiel, en effet, absorbe une fraction de plus en plus importante de l'énergie de compactage du fait que les frottements contre les parois du moule sont de plus en plus faibles. Cette fraction de l'énergie totale est nécessairement limitée à une valeur maximale qui correspond à une modification dans le comportement du volume d'air résiduel. Celui-ci entre alors dans la troisième phase de ses variations.

*Au cours de cette troisième phase,* les résultats expérimentaux nous permettent de constater la constance de la valeur de ce volume d'air, comme les hypothèses précédentes le laissaient logiquement prévoir.

L'analyse de ces divers comportements nous a permis d'expliciter les variations

de la densité apparente, paramètre qui permet de quantifier les conséquences du compactage. Les courbes obtenues présentent l'avantage de montrer ce qui se passerait dans les deux cas théoriques suivants :

— lubrification due à la seule intervention de l'eau excédentaire,

— lubrification due à l'eau excédentaire aidée par une intervention de l'argile gonflée de telle sorte que le volume d'air résiduel dans l'échantillon garde une valeur constante.

Il est certain que cette étude n'a pas la prétention de répondre complètement aux questions soulevées par l'étude d'un mélange binaire en proportions variables, dont l'un des constituants a des propriétés gonflantes. Les résultats expérimentaux obtenus sur deux cas particuliers ont cependant permis de préciser la notion de potentiel de lubrification et de faire ressortir les trois étapes que suit l'argile dans ses interventions. Il reste notamment à préciser la signification physique des paramètres mis en jeu (tels R, C et $k$) et à élargir l'étude de ces comportements en utilisant d'autres mélanges binaires. Une première amorce de cette généralisation pourrait être effectuée en remplaçant la kaolinite par une autre argile dont les propriétés gonflantes seraient plus marquées.

Il serait également opportun d'essayer de préciser avec soin l'influence des caractéristiques physiques ou géométriques du squelette sur les teneurs en argile ($A_3$ et $A_4$) qui définissent les limites entre les trois phases de lubrification mises en évidence.

*Reçu pour publication en avril 1971.*

## SUMMARY

### CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE MECHANISM OF SOIL COMPACTION. THE CONCEPT OF LUBRICATION POTENTIAL

With the help of materials comprising a mixture of sand and clay, and compacted in a mold using the Proctor technique, it was determined that a certain volume of excess water (so called to distinguish it from the water required for swelling of the clay) is necessary to enable maximum sample compaction. This phenomenon can be explained by attribuding to the excess water certain lubricating properties.

On the basis of simple hypotheses incorporating the concept of a lubrication potential, and giving the sample the role of an excess water reservoir, it was possible to establish laws of variations, as a function of clay content, water content and bulk density when the sample is compacted to the maximum.

Three phases were thus observed :

— when the clay content is low (below about 10 p. 100), the lubricating action is due entirely to the excess water ;

— when the clay content is from 10-18 p. 100, the lubricating action of the excess water is complemented by that of the clay present in the sample, in proportion to the clay content ;

— when the clay content exceeds 18 p. 100, the lubricating action of the excess water complemented by that of the clay present in the sample, but is independent of the clay content.

The resulting equations reveal various possibilities of behaviour, depending on the swelling properties of the clay used. Confirmation of the stated results and supplementary data can only be provided by studies carried out on other mixtures.

## ZUSAMMENFASSUNG


### BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DES MECHANISMUS DER BODENVERDICHTUNG. BEGRIFF DES GLEITPOTENTIALS

An Hand von Materialien, die aus Sand und Ton gemischt und in einer Form nach der Proctor Technik verdichtet wurden, gelang es, die Anwesenheit eines gewissen Volumens Wasser (Überschusswasser genannt, da es nicht zum Aufblähen des Tons verwendet wurde) nachzuweisen, das benötigt wird, um die Probe auf des Höchstmass zu verdichten. Dieses benötigte Volumen lässt sich erklären, wenn dem überschüssigen Wasser Eigenschaften zum Verbessern der Gleitfähigkeit zuerkannt werden.

Mit Hilfe einfacher Voraussetzungen, durch Einführung des Begriffs des Gleitpotentials und durch Ansehen der Probe als Behälter für das überschüssige Wasser, konnten die Variationsgesetzes abgeleitet werden, als Funktion des Tongehalts, des Wassergehalts und der Rohdichte, wenn die Probe auf ihr Höchstmass verdichtet ist.

Auf diese Weise liessen sich drei Phasen herausstellen :

— für geringe Tongehalte (weniger als etwa 10 p. 100) hat nur das Überschusswasser eine die Gleitfähigkeit verbessernde Wirkung.

— von etwa 10 bis 18 p. 100 kommt zu der Gleitwirkung des Überschusswassers eine Gleitwirkung hinzu, die der in der Probe enthaltenen Menge des Tons proportional ist.

— beu über 18 p. 100 Tongehalt, gesellt sich zu der Gleitwirkung des Uberschusswassers die Gleitwirkung des Tons, jedoch unabhängig von der Menge des vorhandenen Tons.

Die Gleichungen zeigen Möglichkeiten zu verschiedenem Verhalten, je nach den Aufblähungseigenschaften des verwendeten Tons. Nur die Untersuchung anderer Mischungen könnte die mitgeteilten Ergebnisse bestätigen und zusätzliche genauere Angaben vermitteln.


## РЕЗЮМЕ


### К изучению механизма уплотнения почв. Понятие потенциала смазывания.

А. ФОР.

С помощью материала полученного при смешивании песка и глины в матрице по методу ПРОКТОР, было доказано присутствие некоторого об'ема воды (называемой остаточной водой, ибо она не служит для набухания глины), необходимой для максимального уплотнения образца. Эта необходимость об'ясняется смазывающими свойствами этой воды.

Благодаря простым гипотезам вводящим понятие потенциала смазывания и, придав образцу роль резервуара остаточной воды, стало возможным установить законы вариаций в зависимости от содержания глины и воды, и от видимой плотности в случаях когда образец находится в состоянии максимального уплотнения.

Таким образом удалось выявить три разных фазы :

— при содержаниях глины меньше чем в 10 % только остаточная вода обладает смазывающим действием;

— при содержаниях глины от приблизительно 10-ти % до 18-ти %, к смазывающему действию остаточной воды прибавляется смазывание пропорциональное количеству присутствующей в образце глины;

— при содержании глины превышающем 18 %, к смазывающему действию остаточной воды прибавляется смазывание глины не зависящее от количества ее в образце;

Уравнения выявляют и иные возможности в от зависимости набухательных свойств применявшейся глины, но только изучение разных других смесей может это подтвердить и дополнительно уточнить полученные результаты.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PELTIER, 1951. *Manuel du Laboratoire Routier*, Dunod Éd.

TERZAGHI K., PECK R. B., 1961. *Mécanique des sols appliquée aux Travaux publics et au Bâtiment.* Dunod Éd., 565 p.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (5), 515-525.

# ASSIMILATION NETTE, UTILISATION DE L'EAU ET MICROCLIMATOLOGIE D'UN CHAMP DE MAÏS

## III. — Composition spectrale de la lumière dans la culture

C. VARLET GRANCHER et R. BONHOMME

*Station de Bioclimatologie,*
*Centre de Recherches agronomiques des Antilles et de la Guyane, I. N. R. A.,*
*Petit-Bourg (Guadeloupe)*

RÉSUMÉ

L'assimilation nette de la culture dépend à la fois de l'énergie et de la composition spectrale de la lumière reçue par les feuilles. La composition spectrale de la lumière et notamment le rapport entre les radiations visibles (400-700 nm) utiles à la photosynthèse et les radiations du proche infrarouge d'origine solaire (700-3 000 nm) sont modifiés au sein du couvert végétal.

La composition spectrale en un point donné est exprimée en valeur relative, la base étant la composition spectrale de la lumière solaire mesurée sur un plan horizontal au-dessus de la culture ($G_\lambda$).

La composition spectrale de la lumière à l'emplacement des taches de soleil est indiquée figures 2 et 4. Celle à l'emplacement des zones d'ombre est indiquée figure 5.

Si l'on connaît en outre la surface relative des taches de soleil, il est possible de déterminer, à chaque niveau, l'énergie utile à la photosynthèse (fig. 6) et les propriétés optiques globales du couvert végétal (fig. 7).

## I. — INTRODUCTION

La photosynthèse de chaque feuille d'un couvert végétal dépend pour une large part de l'éclairement qu'elle reçoit ; la quantité (R. Bonhomme *et al.*, 1971) mais aussi la qualité de l'énergie reçue influent sur la production de matière sèche.

L'énergie solaire incidente au-dessus du couvert végétal peut être mesurée et la répartition de l'énergie incidente en fonction de la longueur d'onde est indiquée figure 1 (Bonhomme, 1969).

Les propriétés optiques des feuilles modifient la composition spectrale des rayonnements solaires à l'intérieur du couvert végétal. Nous avons étudié les variations de qualité de la lumière dans une culture de maïs.

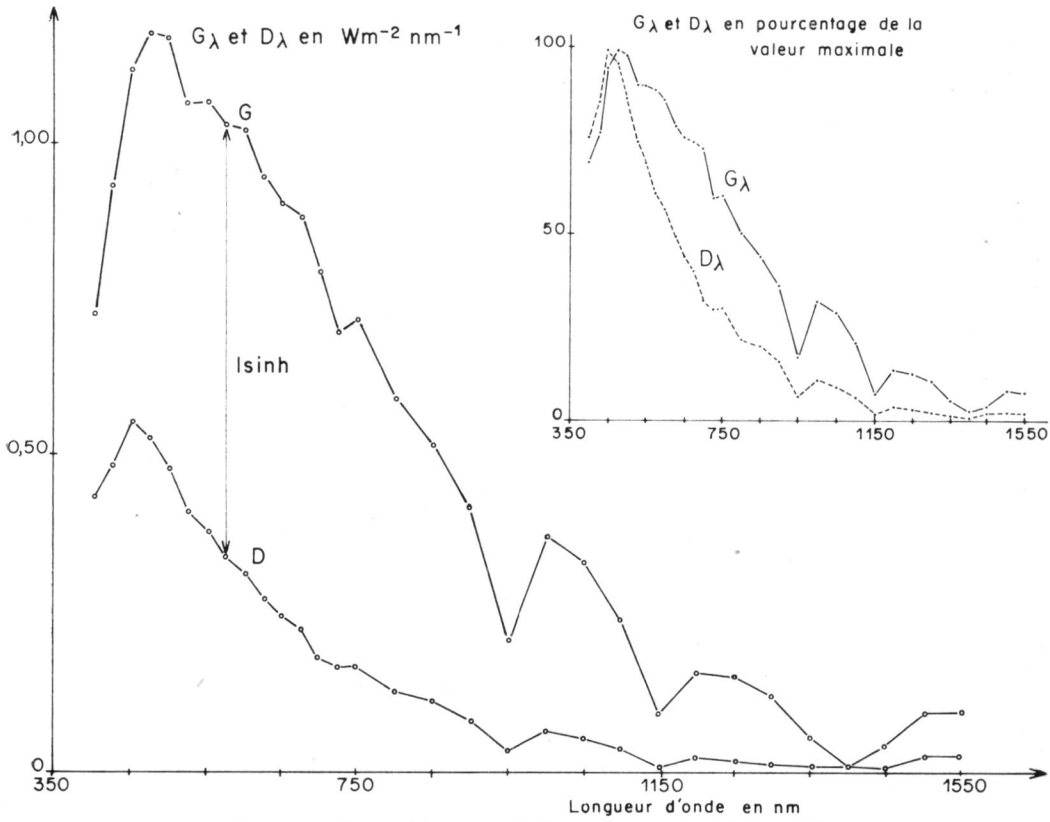



FIG. 1. — *Composition spectrale des rayonnements global et diffus*
(Versailles, 6 août 1969, hauteur du soleil : 46°)
G = 658 $Wm^{-2}$
D = 229 $Wm^{-2}$

## II. — CULTURE ET TECHNIQUES DE MESURE UTILISÉES

La parcelle réservée aux mesures couvre une superficie de 0,5 ha au milieu d'un champ de 2,5 ha. La variété employée (*I.N.R.A. F7 × EP1* : hybride simple), est semée à raison de 80 000 pieds par hectare. L'indice foliaire total est légèrement supérieur à 3. Un dispositif d'irrigation assure aux plantes une réserve hydrique toujours satisfaisante.

Les données présentées résultent des mesures faites au cours des deux périodes : juillet-août 1969 et 1970 ; elles ont été obtenues à l'aide d'un spectroradiomètre (ISCO).

Pour caractériser la quantité moyenne de la lumière à un niveau quelconque de la végétation, il faudrait :

— ou faire un grand nombre de mesures en des points pris au hasard,
— ou disposer d'un capteur suffisamment grand pour donner une valeur représentative de ce niveau.

Or, notre appareil ne présente qu'une surface réceptrice de quelques centimètres carrés, et l'évolution du microclimat lumineux au-dessus de la végétation nous impose de plus un temps de travail assez court interdisant des répétitions nombreuses.

L'énergie à un niveau quelconque de la végétation est apportée par des taches de soleil et par des zones d'ombre ; connaissant par ailleurs leur répartition (BONHOMME *et al.*, 1971), il suffit donc d'étudier la qualité de la lumière à l'emplacement d'une tache de soleil et d'une tache d'ombre pour caractériser la lumière du niveau considéré.

## III. — COMPOSITION SPECTRALE DE LA LUMIÈRE DANS LA CULTURE

### 3.1. — *Cas des taches de soleil*

Pour une hauteur de soleil $h$, nous appelons :

$E_{s\lambda}$ : l'énergie à l'emplacement d'une tache de soleil à un niveau donné pour la longueur d'onde $\lambda$.

$G_\lambda$ : l'énergie du rayonnement global correspondant au-dessus de la végétation pour la même longueur d'onde.

A partir des mesures de $E_{s\lambda}$ et de $G_\lambda$, nous calculons le rapport $E_{s\lambda}/G_\lambda$ aux niveaux 0,30, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50, 1,80 m au-dessus de la surface du sol, et pour différentes hauteurs de soleil.

Pour des hauteurs du soleil élevées ($h$ supérieur à 45 degrés) et pour des niveaux inférieurs à 1,50 m (la culture ayant une hauteur voisine de 2 m) nous n'avons pas observé de différences significatives de $E_{s\lambda}/G_\lambda$ en fonction du niveau. Par ailleurs, la variation de $h$ au-dessus de 45° n'entraîne pas une modification de la qualité de la lumière pour un niveau donné. Il apparaît alors que la composition spectrale de la lumière à l'emplacement des taches de soleil reste identique aux niveaux 0,30, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50 m au-dessus du sol pour toute hauteur du soleil supérieure à 45 degrés.

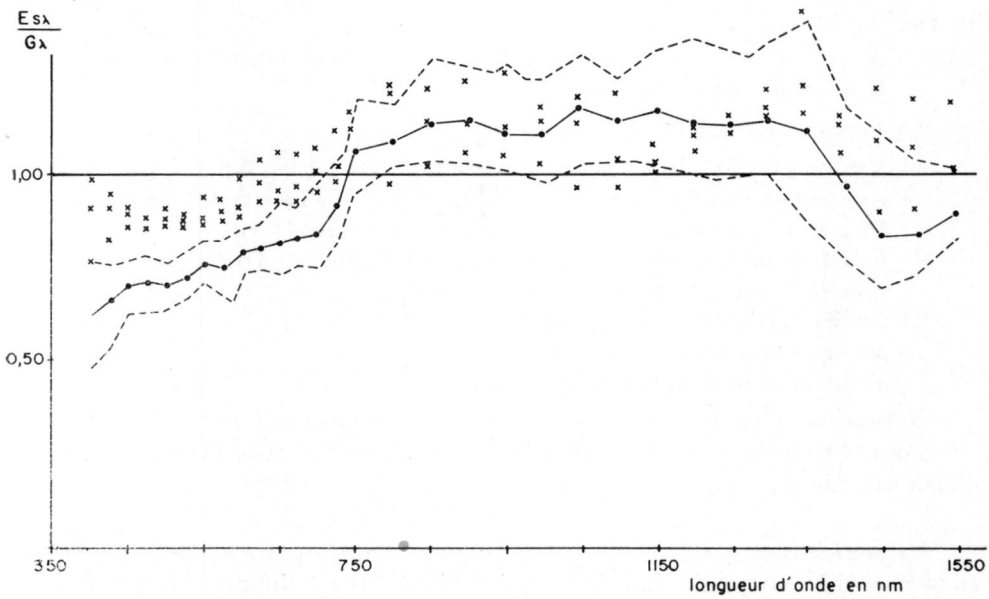



FIG. 2. — *Variation du rapport $E_{s\lambda}/G_\lambda$ en fonction de la longueur d'onde*

Courbes en pointillés, courbe en trait plein : valeurs extrêmes et moyennes de ce rapport pour des hauteurs de soleil $h$ supérieures à 45° et pour les niveaux : 0,30, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50 m. (Indice foliaire $f$ : 3,1, 2,8, 2,0, 1,7, 0,9.)

Les croix correspondent aux mesures effectuées au niveau 1,80 m ($f = 0{,}2$) pour $h > 45°$.

La figure 2 montre ces résultats : les lignes pointillées donnent la dispersion des mesures et la ligne en traits pleins représente la variation de la valeur moyenne. Il apparaît alors que :

— la lumière d'une tache de soleil est appauvrie en rayonnement de courtes longueurs d'onde (inférieures à 700 nm) et plus particulièrement en lumière bleue ;

— l'enrichissement en lumière de longueur d'onde supérieure à 750 nm est apparemment aberrant puisque nous avons $E_{s\lambda}/G_\lambda$ supérieur à 1.

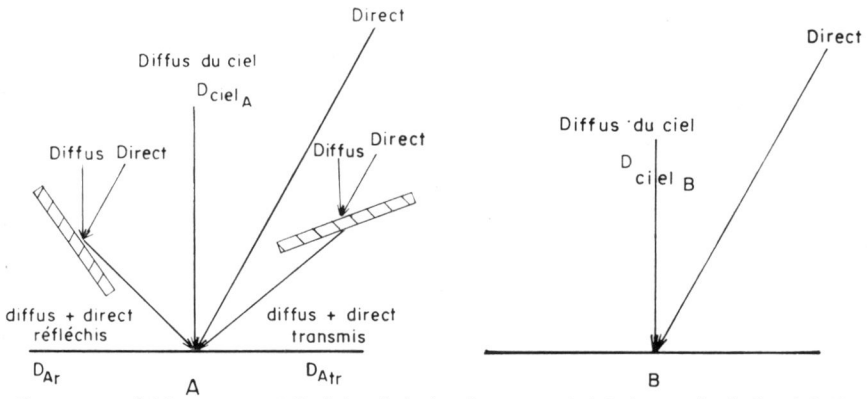



FIG. 3. — *Schéma montrant l'origine de la lumière en un point A au sein de la végétation et en un point B au-dessus de celle-ci*

Nous pouvons expliquer ce résultat en comparant sur le schéma de la figure 3 les points :

— A au sein de la végétation, à l'emplacement d'une tache de soleil,

— B au-dessus de la végétation.

La lumière arrivant en A est due :

— à la pénétration du rayonnement solaire direct : I sin $h$ ;

— à la pénétration du rayonnement diffus du ciel par les « trous » du feuillage $D_{ciel\ A}$ (il y aura donc appauvrissement en lumière bleue) ;

— à la transmission des rayonnements par les feuilles : $D_{Atr}$ ;

— à la réflexion des rayonnements par les feuilles : $D_{Ar}$.

La lumière arrivant en B est due :

— au rayonnement direct : I sin $h$ ;

— au rayonnement diffus du ciel : $D_{ciel\ B}$.

Notons que pour B : I sin $h$ + $D_{ciel\ B}$ = G (rayonnement global).

Pour obtenir un rapport $E_{s\lambda}/G_\lambda$ supérieur à 1, il suffit d'avoir pour une longueur d'onde considérée, l'inégalité suivante :

$$D_{ciel\ B} < D_{ciel\ A} + D_{Atr} + D_{Ar}$$

Or nous savons que la lumière transmise ou réfléchie par une feuille est beaucoup plus riche en proche infrarouge qu'en visible. Il est donc possible d'obtenir l'inégalité précédente pour les longueurs d'onde supérieures à 750 nm. Il n'en reste pas moins que l'énergie reçue sur une grande surface comprenant à la fois des taches de soleil et des zones d'ombre, au niveau considéré, pour cette gamme de longueur d'onde, est bien inférieure à l'énergie incidente.

Dans la couche supérieure du couvert végétal (pour ces hauteurs de soleil élevées) la composition spectrale de la lumière à l'emplacement des taches de soleil tend vers celle du rayonnement global. La figure 2 met en évidence pour le niveau 1,80 m cette modification ; le moindre affaiblissement de la lumière visible (dû au terme $D_{ciel\ A}$) est assez marqué.

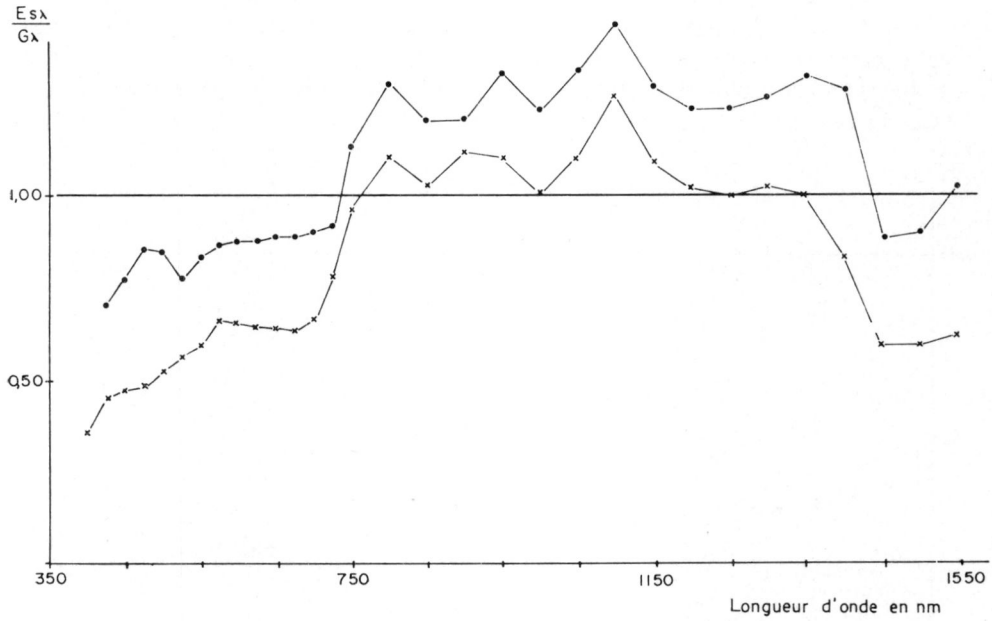



FIG. 4. — *Variation de $E_{s\lambda}/G_\lambda$ en fonction de λ pour une hauteur du soleil de 27°*
×———× Niveau 0,60 m ($f = 2,8$)
●———● Niveau 1,20 m ($f = 1,7$)

Pour les faibles valeurs de *h*, les mesures sont plus difficiles à réaliser : les résultats portés sur la figure 4 (pour une hauteur du soleil de 27 degrés) semblent cependant montrer que d'un niveau à l'autre, $E_{s\lambda}/G_\lambda$ varie assez nettement ; les points figuratifs de $E_{s\lambda}/G_\lambda$ en fonction de la longueur d'onde ne s'intègrent pas dans le nuage des mesures obtenues précédemment.

### 3.2. — *Cas des zones d'ombre*

Pour une hauteur de soleil *h*, nous appelons :

$E_{o\lambda}$ : l'énergie à l'emplacement d'une zone d'ombre à un niveau donné pour la longueur d'onde λ.

De la même manière que précédemment (par. 3.1), nous calculons $E_{o\lambda}/G_\lambda$ aux différents niveaux considérés.

Pour tout niveau inférieur à 1,50 m et pour des valeurs de h supérieures à 45°, nous n'avons pas observé de différence marquée de $E_{o\lambda}/G_\lambda$ en fonction du niveau ou de la hauteur du soleil. La composition spectrale de la lumière à l'emplacement d'une zone d'ombre est donc la même pour les niveaux 0,30, 0,60, 0,90, 1,20 et

1,50 m quelle que soit la hauteur du soleil entre 45 et 60 degrés, comme l'indiquent les valeurs portées sur la figure 5. Ce même graphique montre que la lumière d'une zone d'ombre est :

— très atténuée dans la gamme des longueurs d'onde inférieures à 700 nm ($E_{o\lambda}/G_\lambda = 0{,}12$ pour $\lambda = 500$ nm) ;

— relativement enrichie en infrarouge ($E_{o\lambda}/G_\lambda = 0{,}40$ pour $\lambda = 1\,000$ nm).

Les mesures de qualité de la lumière des zones d'ombre de la couche supérieure (fig. 5) montrent un léger enrichissement en radiations visibles ; cette augmentation est due à la part plus importante, pour les niveaux supérieurs, du rayonnement diffus du ciel, $D_{ciel\ A}$.

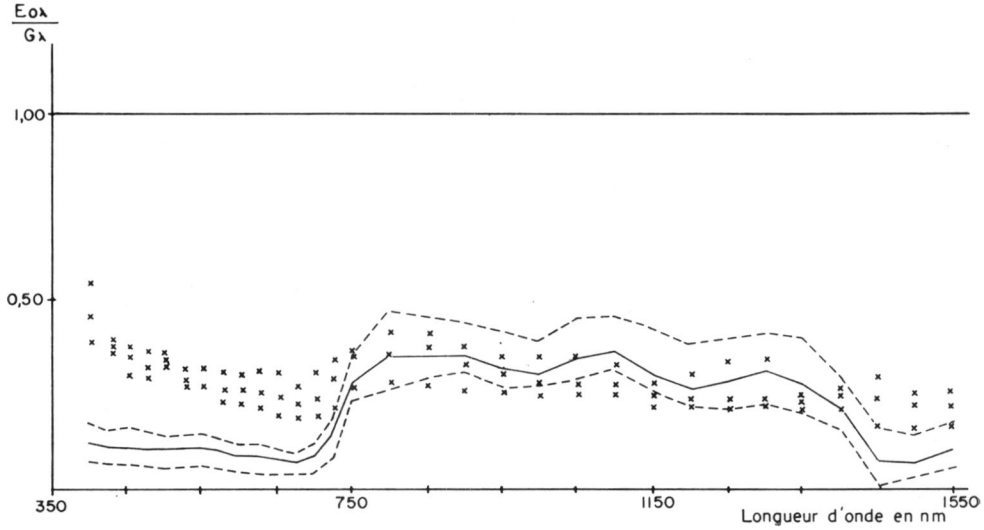



FIG. 5. — *Variation du rapport $E_{o\lambda}/G_\lambda$ en fonction de la longueur d'onde*

Courbes en pointillés, courbe en trait plein : valeurs extrêmes et moyenne de ce rapport pour des hauteurs de soleil $h$ supérieures à 45° et pour les niveaux : 0,30, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50 m.
Les croix correspondent aux mesures effectuées au niveau 1,80 m pour $h > 45°$.

## IV. — EXEMPLES D'UTILISATION DES MESURES DE COMPOSITION SPECTRALE

### 4.1. — *Contribution des taches de soleil et des zones d'ombre à l'énergie utile pour la photosynthèse à un niveau donné*

Nous considérons comme énergie utile à la photosynthèse toute l'énergie correspondant à la gamme des longueurs d'onde 400-700 nm. Dans ces conditions, une tache de soleil apporte une énergie utile à la photosynthèse égale à :

$$E_{sph} = \sum_{400}^{700} E_{s\lambda}\ \Delta\lambda$$

où $E_{s\lambda}$ est l'énergie reçue à l'emplacement d'une tache de soleil pour une longueur d'onde $\lambda$.

Une tache d'ombre apporte :

$$E_{oph} = \sum_{400}^{700} E_{o\lambda}\ \Delta\lambda$$

où $E_{o\lambda}$ est l'énergie reçue à l'emplacement d'une zone d'ombre pour la longueur d'onde $\lambda$.

L'emploi de la technique des photographies hémisphériques (R. BONHOMME, 1970) nous permet de connaître, pour une hauteur de soleil donnée, la répartition des taches de soleil et des zones d'ombre par niveau.

Si $s$ représente la surface relative des taches de soleil, rapportée à l'unité de surface de sol, mesurée sur un plan horizontal, la valeur complémentaire $(1 - s)$ représente la surface relative des zones d'ombre.

L'énergie utile à la photosynthèse apportée par des taches de soleil au niveau considéré, et pour une hauteur de soleil $h$, est :

$$W_{sph} = E_{sph} \cdot s$$

L'énergie utile à la photosynthèse apportée par les taches d'ombre est alors

$$W_{oph} = E_{oph} \cdot (1 - s)$$

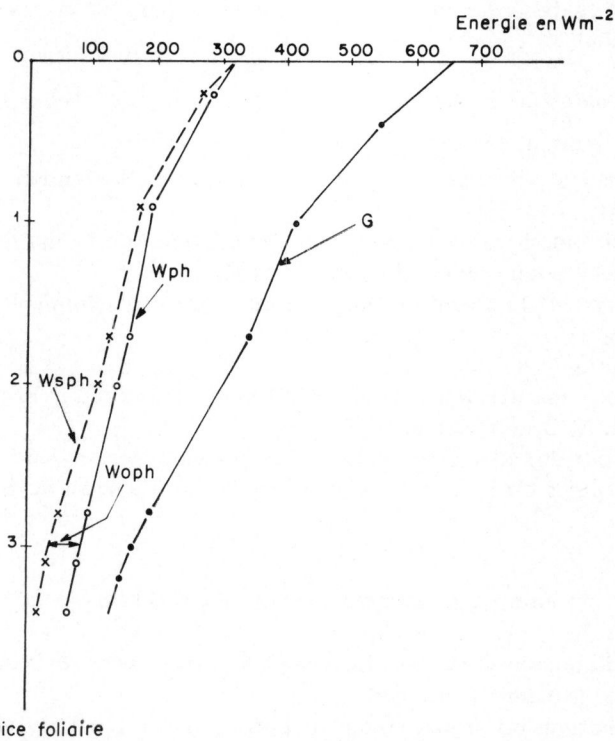



FIG. 6. — *Énergie globale et énergie utile à la photosynthèse* (longueur d'onde 400-700 nm) *fournie par les taches de soleil* $W_{sph}$ *et par les zones d'ombre* $W_{oph}$, *en fonction de l'indice foliaire f*

$G = 658\ Wm^{-2}$
$h = 46°$

L'énergie totale utile à la photosynthèse disponible pour les plantes à ce niveau, pour la hauteur du soleil $h$, est donnée par :

$$W_{ph} = W_{sph} + W_{oph}$$

A partir de la composition spectrale du rayonnement global au-dessus de la végétation et des coefficients $E_{s\lambda}/G_\lambda$, $E_{o\lambda}/G_\lambda$ (fig. 2 et 5), nous pouvons tracer la répartition de l'énergie visible entre les taches de soleil et les zones d'ombre à chaque niveau. On peut calculer $E_{sph}$ et $E_{oph}$ puis $W_{sph}$ et $W_{oph}$. Les résultats relatifs à à un ciel clair apparaissent sur la figure 6 :

— la contribution des taches de soleil décroît rapidement ;
— la contribution des zones d'ombre, nulle au niveau supérieur, croît lentement en fonction de l'indice foliaire $f$ ;
— jusqu'au niveau 0,60 m (indice foliaire égal à 3,1), ce sont les taches de soleil qui fournissent le plus d'énergie utile à la photosynthèse.

Les résultats ci-dessus se rapportent aux plans horizontaux. Or ce sont les feuilles qui ont de l'importance dans l'assimilation nette des cultures. Les feuilles ont une orientation quelconque et peuvent en outre être à l'ombre ou au soleil. Il est toutefois possible de calculer les éclairements monochromatiques qu'elles subissent dans chaque tranche de végétation (CHARTIER, 1969), compte tenu des résultats présentés paragraphe 3. Par ailleurs, les surfaces des feuilles de chaque tranche soumises à tel ou tel éclairement monochromatique peuvent être aussi déterminées (CHARTIER, 1969).

4.2. — *Composition spectrale de la lumière totale absorbée par la culture*

Pour une hauteur du soleil $h$, nous pouvons définir :

$R_\lambda$ : coefficient de réflexion monochromatique de la lumière réfléchie par le couvert ;

$T_\lambda$ : coefficient de transmission monochromatique de la lumière au sol, après son passage au travers du couvert végétal ;

$A_\lambda$ : coefficient d'absorption monochromatique de la lumière absorbée par la culture.

Par définition : $R_\lambda + T_\lambda + A_\lambda = 1$.

Nous avons mesuré par ailleurs $R_\lambda$ (VARLET GRANCHER, BONHOMME, 1970) ; pour atteindre $A_\lambda$ il faut connaître $T_\lambda$.

A partir des données précédentes, nous pouvons écrire (pour une hauteur de soleil donnée et si $s$ est la surface relative des taches de soleil au sol) :

$$T_\lambda = \frac{E_{s\lambda}}{G_\lambda} s + \frac{E_{o\lambda}}{G_\lambda} (1 - s)$$

La figure 7, donnant la variation de $A_\lambda$ en fonction de la longueur d'onde, montre que :

— les radiations visibles sont fortement absorbées avec un minimum aux environs de 550 nm (jaune-vert) ;
— les radiations infrarouge comprises entre 750 et 1 350 nm sont peu absorbées ;
— à partir de 1 350 nm l'absorption redevient importante (absorption par l'eau).

Nous retrouvons là une variation analogue à celle de l'absorption monochromatique d'une feuille.

Connaissant l'énergie réfléchie, transmise au sol ou absorbée par la culture, il est possible de faire un bilan des rayonnements dans le proche infrarouge d'une part, et dans le visible, d'autre part. Les résultats trouvés sont en bon accord avec ceux obtenus par d'autres auteurs (YOCUM, ALLEN, LEMON, 1964).

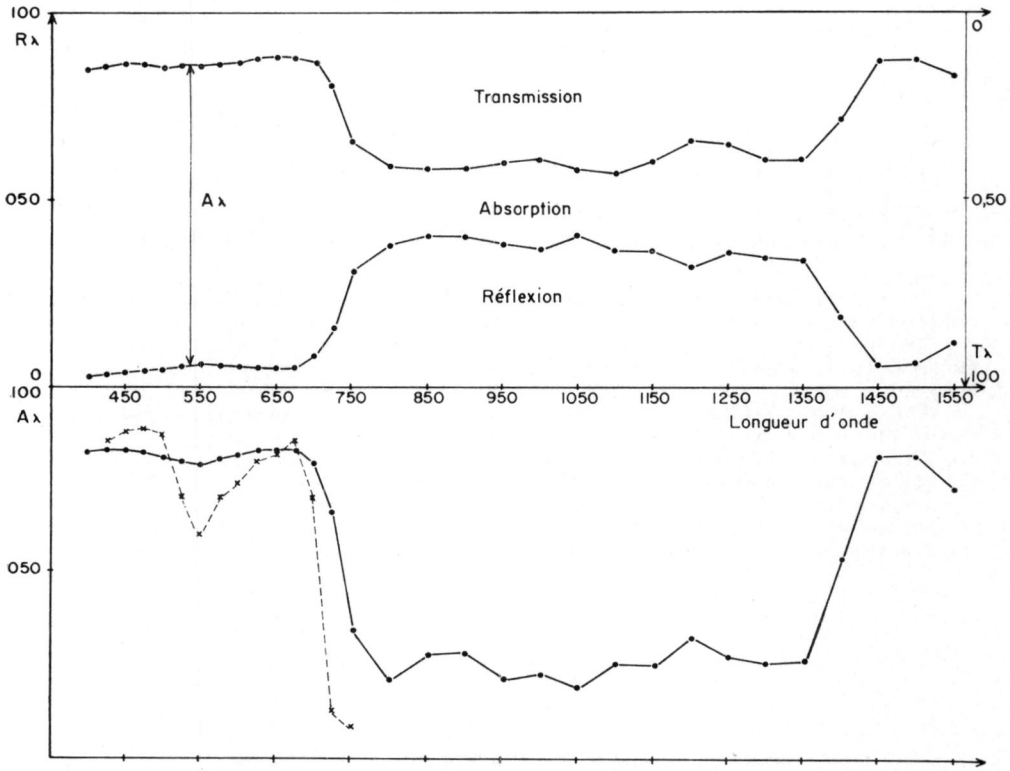



FIG. 7. — *Variation des coefficients de réflexion, transmission, absorption de la culture* (F = 3,4) *en fonction de la longueur d'onde*

Partie inférieure :
●————● Variation de $A_\lambda$ en fonction de λ pour la culture de maïs.
×————× Variation du coefficient d'absorption d'une feuille de maïs (YOCUM, ALLEN, LEMON, 1964).

## V. — CONCLUSION

Cette étude montre que la composition spectrale de la lumière est différente à l'emplacement d'une tache de soleil ou d'une zone d'ombre (fig. 2 et 5). Pour chacun de ces domaines la qualité des rayonnements varie peu en fonction du niveau, à l'exception toutefois de la couche supérieure du couvert végétal où l'on note un enrichissement en radiations visibles et plus particulièrement en lumière bleue. Il devient possible de caractériser la qualité moyenne de l'énergie solaire à un niveau de la végétation, connaissant par ailleurs les profils de répartition des taches de soleil et des zones d'ombre.

Les résultats obtenus nous ont permis de calculer l'atténuation de la lumière directement utile à la photosynthèse (400-700 nm) dans la culture de maïs ; ils peuvent aussi être utilisés pour l'étude d'autres problèmes photobiologiques.

*Reçu pour publication en mars 1971.*

## SUMMARY

### NET ASSIMILATION, WATER USE AND MICROCLIMATE OF A MAIZE CANOPY III. — SPECTRAL COMPOSITION OF THE LIGHT INSIDE THE CROP

The net assimilation of the crop depends on the solar radiation intercepted by the leaves. The response of the leaf varies according to the energy and the spectral composition of the light.

The spectral composition of the light and especially the ratio of photosynthetical active radiations (400-700 nm) to the near infrared radiations from the sun (700-3 000 nm) are modified inside the canopy.

The spectral composition is expressed in relative value. The basis is the spectral composition of the sunlight as measured upon an horizontal plane above the canopy ($G_\lambda$).

The spectral composition of the light of the sunfleck areas is shown on figures 2 and 4. For the shaded area, it is shown on figure 5.

From the relative sunfleck area profile and the spectral composition of the light in sunlit and shaded areas, it is possible to compute the energy which can be used for photosynthesis (fig. 6) and the optical properties of the whole canopy (fig. 7).

## ZUSAMMENFASSUNG

### REINE ASSIMILIERUNG, VERWENDUNG DES WASSERS UND MIKROKLIMATOLOGIE EINES MAISFELDES III. — SPEKTRALZUSAMMENSETZUNG DES LICHTES IN DER KULTUR

Die reine Assimilierung der Kultur ist zugleich von der Energie und der Spektralzusammensetzung des durch die Blätter empfangenen Lichtes abhängig. Die Spektralzusammensetzung des Lichtes und insbesondere die Beziehung zwischen den der Photosynthese nützlichen sichtbaren Strahlen (400-700 nm) und denen des nahen Ultrarotes vom Sonnenlicht 700-3 000 nm) werden im Innern der Pflanzendecke verändert.

Die Spektralzusammensetzung in einem bestimmten Punkt wird als relativer Wert ausgedrückt, wobei die Basis in der auf riner wagerechren Ebene oberhalb der Kultur ($G\lambda$) gemesenen Zusammensetzung des Sonnenlichtes besteht.

Die Spektralzusammensetzung des Lichtes bei dem Stellen der Sonnenflecken wird in den Abbildungen 2 und 4 dargestellt. Dieselbe bei den Stelen der Dunkelzonen wird in der Abbildung 5 gezeigt.

Ausserdem, wenn man die relative Fläche der Sonnenflecken kennt so ist es möglich, die für Phytozynthese nutzbare Energie (Abb. 6) und die globalen optmischen Eigenschaften der Pflanzendecke (Abb. 7) festzustellen.

## РЕЗЮМЕ

Чистое усвоение, влагопотребление и микроклиматология кукурузного поля. III. Спектральный состав света внутри культуры.

К. ВАРЛЭ-ГРАНШЭ, Р. БОНОММ.

Чистое усвоение света культурой зависит, в одно и то-же время, от энергии и от спектрального состава полученного листьями света. Этот спектральный состав, и в частности, соотношение между видимыми излучениями (400 — 700 нм) необходимыми для фотосинтеза, и близлежащими инфра-красными излучениями солнечного происхождения (700 — 3 000 нм), изменяется внутри растительного покрова.

Спектральный состав света в данной точке выражается в относительных величинах на базе спектрального состава солнечного света в горизонтальном плане над культурой. (Gλ)

Спектральный состав света на местах солнечных пятен в культуре указан на рисунках 2 и 4, а в теневых зонах культуры — на рисунке 5.

Если, кроме того, известна относительная площадь солнечных пятен, становится возможным определить, на каждом уровне, полезную для фотосинтеза энергию (рис. 6) и общие оптические свойства растительного покрова.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BONHOMME R., 1969. Contribution à l'étude de la composition spectrale des rayonnements d'origine solaire à l'air libre et sous une serre. *Ann. agron.*, **20** (2), 183-200.

BONHOMME R., 1970. L'analyse de la surface des taches de soleil, de l'indice foliaire, et de l'inclinaison moyenne des feuilles à l'aide des photographies hémisphériques. *Colloque sur la réponse des plantes aux facteurs climatiques*, UNESCO, Uppsala 15-20 septembre, (sous presse).

BONHOMME R., 1970. Surface relative des taches de soleil dans la végétation. In *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère* . I. N. R. A., Paris, 99-104.

BONHOMME R., CHARTIER P., VARLET GRANCHER C., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. II. Éclairement d'un plan horizontal au-dessus et aux différents niveaux de la culture. *Ann. agron.*, **22** (4), 383-396.

CHARTIER Ph., 1969. Assimilation nette d'une culture couvrante. I. Détermination de l'assimilation nette de la culture à partir d'une analyse théorique. *Ann. Physiol. Vég.*, **11** (2), 123-159.

EVANS G. C., 1969. The spectral composition of light in the field. I. Its measurement and ecological importance. *J. Ecol.*, **57** (1), 109-126.

LOONEY N. E., 1968. Light regimes within standard size apple trees as determined spectrophotometrically. *Proc. amer. Soc. hort., Sci.* **93**, 1-6.

ROBERTSON G. W., HOLDES R. M., 1963. A spectral light meter : its construction, calibration, and use. *Ecology*, **44** (2), 419-423.

VARLET GRANCHER C., BONHOMME R., 1970. Albédo et réflexion monochromatique de la lumière solaire par une culture. *La Météorologie*, (sous presse).

VEZINA, BOULTER, 1966. The spectral composition of near ultraviolet and visible radiation beneath forest canopies. *Canad. J. Bot.*, **44** (10), 1267-1284.

YOCUM C. S., ALLEN L. H., LEMON E. R., 1964. Photosynthesis under field conditions. IV. Solar radiation balance and photosynthetic efficiency. *Agron. J.*, **56**, 249-253.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (5), 527-536.

# DÉTERMINATION DE LA CONSTANTE DE STABILITÉ DES COMPLEXES FORMÉS ENTRE LE FER ET LES SUBSTANCES CONTENUES DANS L'EXTRAIT AQUEUX DE RÉSIDUS DE VÉGÉTAUX D'ORIGINES DIVERSES

C. COURPRON

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,*
*33 - Pont-de-la-Maye*

RÉSUMÉ

La détermination des constantes de stabilité des complexes organo-métalliques susceptibles de se former entre le fer et les extraits aqueux de résidus de végétaux a permis d'établir globalement un classement entre les différentes sources de matières organiques, en ce qui concerne leur capacité de séquestration vis-à-vis du fer.

Il n'est apparu aucune relation étroite et directe entre le pouvoir complexant et le pouvoir mobilisateur des extraits aqueux, ce qui prouve que leur action complexante ne constitue qu'une des composantes de leur pouvoir mobilisateur global.

## I. — INTRODUCTION

Dans un travail antérieur (COURPRON, 1967), nous avons mis au point un ensemble de méthodes permettant d'évaluer la constante de stabilité des complexes organo-métalliques formés entre certains métaux lourds (cuivre et zinc) et les fractions humiques et fulviques extraites de la matière organique d'un sol.

Cet ensemble de méthodes peut sans nul doute faire l'objet d'une utilisation plus générale et être appliqué, par exemple, à l'étude des complexes formés entre des métaux et des solutions contenant des substances organiques indéterminées aussi bien qualitativement que quantitativement, mais dont la structure chimique confère à la solution un caractère complexant global qu'il peut être utile, dans certains cas, de chiffrer.

Dans le présent travail, nous nous sommes plus précisément attaché à appliquer ces méthodes à la détermination des constantes de stabilité des complexes organo-métalliques susceptibles de se former entre le fer et les substances hydrosolubles contenues dans l'extrait aqueux de résidus de végétaux, d'origine et de degré d'évolution différents. Un très grand nombre de travaux ont en effet mis en évidence le rôle essentiel joué par ces complexes, aussi bien en ce qui concerne la genèse des sols que la nutrition des plantes (notamment la nutrition en oligo-éléments) ; la connaissance de leur stabilité doit permettre de mieux les situer les uns par rapport aux autres dans les processus où ils peuvent intervenir : à titre d'exemple, nous avons également essayé dans ce travail d'établir un parallélisme entre la valeur des constantes de stabilité et le pouvoir « mobilisant » d'un certain nombre de ces extraits de végétaux, qui intervient plus particulièrement au cours de la podzolisation.

## II. — MATÉRIEL, MÉTHODES ET TECHNIQUES UTILISÉES

### A. — *Matériel*

Les matières végétales et amendements organiques choisis sont au nombre de 11.

— paille de blé (résidu de culture)
— foin de luzerne
— compost de champignon
— fumier de ferme
— marcs de raisin (résidu de distillation)
— tiges de maïs (résidu de culture)
— litière (mousses-lichens, prélevés en hiver)
— fougère (*Pteridium aquilinum* prélevée en été)
— Molinie (*Molinia coerulea*)
— écorce de feuillus (chêne)
— écorce de résineux (pin maritime)

Les six premiers ont été choisis en raison de leur utilisation traditionnelle ou possible en agriculture en tant qu'amendement organique ; les trois suivants (litière, *Pteridium aquilinum*, *Molinia coerulea*), en raison de leur présence en quantités importantes sur tous les profils des sols sableux podzoliques de landes ; les deux écorces en raison de l'utilisation éventuelle de ces sous-produits de l'industrie papetière en tant que support des cultures.

TABLEAU I

*Caractéristiques des extraits aqueux de végétaux*

| Végétal | Matière sèche (g/l) | Cendres (g/l) | Carbone (g/l) |
|---|---|---|---|
| Paille de blé ..... | 5,62 | 1,91 | 2,06 |
| Foin de luzerne ..... | 19,12 | 5,03 | 7,82 |
| Compost de champignon.. | 2,53 | 1,52 | 0,56 |
| Fumier de ferme ..... | 6,04 | 3,40 | 1,46 |
| Marcs de raisin..... | 4,41 | 2,10 | 1,28 |
| Tiges de maïs..... | 4,89 | 1,35 | 1,96 |
| Litière ..... | 1,29 | 0,14 | 0,64 |
| *Pt. aquilinum* ..... | 10,33 | 3,78 | 3,64 |
| *M. coerulea*..... | 8,12 | 2,25 | 3,26 |
| Écorce de feuillus ..... | 2,14 | 0,26 | 1,04 |
| Écorce de résineux ..... | 2,34 | 0,13 | 1,22 |

Tous ces végétaux, après séchage à 105°C en étuve ventilée, sont finement pulvérisés afin d'en obtenir une poudre homogène.

Les extraits aqueux sont obtenus par agitation, pendant une heure, de 10 g de poudre végétale dans 100 ml d'eau bipermutée. Après centrifugation et filtration, ces solutions sont amenées au même pH ($pH_4$) par addition de HCl ou KOH. Ces extraits aqueux ont été caractérisés par leur teneur en matière sèche, en cendres et en carbone (tabl. 1).

## B. — *Méthodes et techniques utilisées pour la détermination de la constante de stabilité des extraits aqueux*

### 1. *Méthodes.*

Les méthodes usuellement utilisées pour déterminer les constantes de stabilité des complexes organo-métalliques ne peuvent être appliquées dans le cas de cette étude par suite du manque total d'informations relatives à la quantité et à la structure chimique des substances complexantes contenues dans les extraits aqueux des résidus de végétaux. Il faudra la juxtaposition de deux méthodes pour pallier cette indétermination :

— l'une fait appel au principe d'échange ionique d'une résine (SCHUBERT, 1948) ;

— l'autre fait intervenir la capacité complexante maximum de la solution étudiée.

a) *Principe d'échange ionique des résines.*

Ce principe et la méthode qui en dérive ont été décrits en détail dans une publication antérieure (COURPRON, 1967). Rappelons sommairement que lors de la mise en présence en solution d'un métal M et d'un agent complexant R aboutissant à la formation du complexe $MR_x$, il se produit la réaction d'équilibre :

$$M + xR \rightleftarrows MR_x$$

La constante de fonction K est donnée par l'équation suivante :

$$K = \frac{(MR_x)}{(M)\ (R)^x}$$

(M) étant la concentration molaire de l'ion métal

(R) la concentration de l'agent complexant exprimée en moles/litre

$x$ le nombre de moles d'agent complexant se combinant à un ion métal.

Le principe d'échange ionique des résines est basé sur la sélectivité que possède une résine cationique de retenir seulement les cations métalliques non complexés ; il permet de relier la constante de stabilité à la concentration de l'agent complexant (R) par l'intermédiaire de constantes de distribution du métal entre la résine et la solution ($\lambda$ et $\lambda_0$) selon l'équation de MARTELL et CALVIN :

$$K = \frac{\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1}{(R)^x}$$

soit

$$\log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right) = \log K + x \log (R) \qquad (1)$$

La pente et l'ordonnée à l'origine du graphique $\log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right)$ en fonction de log (R) donnent les valeurs de $x$ et de log K. En réalité (R) n'étant connu qu'en valeur relative, c'est seulement $x$ qui est fourni par cette méthode. On obtient donc le nombre de moles de l'agent complexant qui se combine à un ion métal, c'est-à-dire la composition stœchiométrique du complexe étudié.

b) *Mesure de la capacité complexante maximum.*

Elle a pour but de déterminer (R). A cet effet, on mesure la capacité complexante maximum de la solution organique, c'est-à-dire la quantité de métal qui se complexe à un volume donné de la solution. Pour cela, on adopte une technique différente de celle décrite lors de l'étude des complexes organo-métalliques des sols. Elle consiste à mettre en présence un volume connu d'extrait aqueux et de l'hydroxyde de fer. Après agitation et centrifugation, on détermine la quantité de métal mise en solution sous forme de complexe par l'extrait aqueux.

En résumé, la mise en œuvre des deux techniques permet de déterminer successivement :

— le nombre de moles d'agent complexant qui se combine à un ion-métal (fer : 56 g) ;

— le poids de fer A qui se combine à un volume connu de solution complexante (10 ml par exemple) ce qui permet d'accéder à la concentration molaire (R) et partant, à log K par l'intermédiaire de l'équation (1).

2. *Mode opératoire.*

a) *Détermination de x.*

Dans des fioles de 50 ml, on ajoute successivement :

— des quantités allant de 0 à 25 ml de l'extrait aqueux,

— de l'eau bipermutée jusqu'à 35 ml environ,

— 5 ml de KCl N,

— 3 ml de solution de chlorure ferrique contenant 10 mg de fer dans 100 ml d'eau (addition de 2 ml d'une solution de $^{59}Fe$, d'activité 3,46 µCi/ml).

Le pH du contenu de ces fioles est ajusté à 4 ; chaque fiole est complétée avec de l'eau. Ces fioles sont transvasées dans des flacons plastiques contenant 1 g de résine Amberlite IR 120 précédemment saturée en potassium par addition de KOH N puis lavée et séchée à 40°C pendant 36 heures.

L'ensemble est agité 1 heure, puis filtré pour retenir la résine. Dans le surnageant, le $^{59}Fe$ est dosé directement au compteur à scintillation, ce qui permet de chiffrer la quantité de fer qui n'a pas été retenue par la résine. L'utilisation du fer marqué a uniquement pour but d'augmenter la rapidité et la précision des dosages, la détermination du fer dans des extraits contenant des substances organiques par une méthode de dosage colorimétrique exigeant une minéralisation préalable de l'extrait.

Les constantes de distribution $\lambda$ et $\lambda_0$ sont calculées de la manière suivante :

$$\lambda_0 = \frac{\alpha_0}{100 - \alpha_0} \frac{V}{P} \text{ et } \lambda = \frac{\alpha}{100 - \alpha} \frac{V}{P}$$

$\alpha_0$ = quantité de métal liée à la résine en p. 100 de la quantité initiale,
$100 - \alpha_0$ = quantité de métal restant en solution en p. 100 de la quantité initiale, ceci en l'absence de solution complexante ;
$\alpha$ = quantité de métal liée à la résine en p. 100 de la quantité initiale,
$100 - \alpha$ = quantité de métal restant en solution en p. 100 de la quantité initiale, en présence d'agent complexant,
V = volume de la solution (ici 50 ml),
P = poids de résine (ici 1 g).

On détermine $x$ en mesurant la pente de la droite obtenue en traçant sur papier logarithmique $\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right)$ en fonction de (R), ayant donné à (R) des valeurs relatives.

b) *Détermination de la capacité complexante maximum.*

10 ml d'extrait aqueux (amenés au volume de 50 ml et à pH 4), sont transvasés dans un tube de centrifugeuse contenant 100 mg d'hydroxyde de fer, que l'on agite mécaniquement pendant 2 heures. Après centrifugation et filtration, on dose le fer dans le filtrat de la manière suivante :

10 ml du filtrat, placés dans une capsule en silice, sont amenés à sec sur plaque chauffante. Leur minéralisation s'effectue au four à 480°C pendant 2 heures. On reprend le résidu par 5 ml d'HCl R. P. que l'on fait bouillir sans perte. On filtre sur fiole de 50 ml. Le fer est alors dosé par colorimétrie du complexe orthophénanthroline-fer (SANDELL, 1959).

L'hydroxyde de fer est préparé en faisant dissoudre 45 g de chlorure ferrique dans 1 litre d'eau bipermutée. Cette solution est amenée à pH 7 avec NaOH 4 N. On attend une nuit que la précipitation soit totale. On centrifuge et on lave l'hydroxyde 3 fois avec 50 ml d'eau, il est ensuite séché à 40°C pendant 48 heures et finement broyé au mortier d'agathe.

3. *Exemple de mode de calcul* (tableau 2)

La représentation graphique de $\log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right)$ en fonction de log (R) (nombre de ml d'extrait aqueux), est une droite dont la pente est $x = 1{,}33$ (fig. 1).

Par ailleurs, la détermination de la capacité complexante indique que 10 ml d'extrait aqueux de fougère complexe 139 µg de fer.

Donc : 1,33 moles (apparentes) d'extrait aqueux complexent 56 g de fer ; 10 ml d'extrait aqueux complexent 139 µg de fer.

Un calcul simple fournit la concentration molaire apparente de l'extrait aqueux de fougère :

$$R = 3{,}30 \times 10^{-4}\ M/l$$

Calcul de log K :

Lorsqu'on met 10 ml de cet extrait aqueux dans une fiole de 50 ml la concentration de la solution est :

$$3{,}30 \times 10^{-4} \times 10^{-3} \times \frac{10}{50} = 6{,}60 \times 10^{-8}$$

$$\log K = \log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1\right) - x \log (R)$$

$$= \log (66{,}0) - 1{,}33 \log (6{,}6 \times 10^{-8}) = 11{,}369$$

C. — *Méthode utilisée pour la détermination du pouvoir « mobilisant » des extraits aqueux*

100 g de sol dunaire, sableux, très pauvre en matière organique (0,3 p. 100), riche en sesquioxydes de fer (fer soluble dans les acides forts = 7,27 p. 1 000 terre fine sèche) sont placés dans une allonge en verre de 2,5 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, munie à sa partie inférieure d'une toile de nylon à très petites mailles. Ce sol reçoit quotidiennement 50 ml d'extrait aqueux dont le débit est réglé au goutte à goutte. Par mesure du volume du percolat et de sa teneur en fer (après minéralisation), on détermine la quantité de fer total solubilisé et entraîné hors du sol par le passage de la solution complexante. Cette quantité de fer est considérée comme indice du pouvoir « mobilisant » de l'extrait aqueux. Un témoin est fourni par une colonne dans laquelle le sol reçoit 50 ml d'eau bipermutée. Les extraits aqueux ont été amenés à pH 4 avec HCl N afin de se trouver dans les mêmes conditions de pH que lors de la détermination des constantes de stabilité. L'expérience a duré 12 jours.

## III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. — *Constantes de stabilité des extraits aqueux des différents résidus végétaux*

Les résultats ont été regroupés dans le tableau 3.

A titre comparatif, on a également fait figurer dans ce tableau les constantes de stabilité d'un certain nombre de chélates de fer de synthèse qui sont couramment utilisés en agriculture et la constante de stabilité du complexe acide citrique-fer.

Ces résultats permettent de classer les différents résidus de végétaux en deux groupes en fonction de leur log K :

— ceux dont la constante est située entre 13 et 18 : paille de blé, fumier de ferme, foin de luzerne, tige de maïs ;

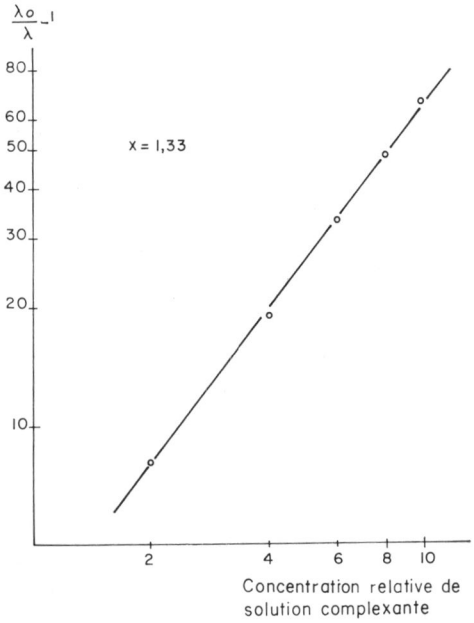



FIG. 1. — *Détermination de la composition stœchiométrique du complexe fer-extrait aqueux de fougère*

TABLEAU 2

*Cas du complexe fer-extrait aqueux de fougère : exemple de mode de calcul*

| Volume d'extrait aqueux (ml) | Radioact. du $^{59}Fe$ Coup/mn | $\alpha_o$ | $100 - \alpha_o$ | $\lambda_o$ | $\lambda$ | $\frac{\lambda_o}{\lambda} - 1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 100 | 98,54 | 1,46 | 3 374 | — | — |
| 2 | 840 | 87,69 | 12,31 | | 356 | 8 |
| 4 | 1 540 | 77,42 | 22,58 | | 171 | 19 |
| 6 | 2 280 | 66,57 | 33,43 | | 99 | 33 |
| 8 | 2 865 | 58,00 | 42,00 | | 69 | 48 |
| 10 | 3 405 | 50,08 | 49,92 | | 50 | 66 |

Radioactivité initiale : 6 820 cp/mn.

— ceux dont la constante a une valeur inférieure à 10 : fougère, marcs de raisin, compost de champignons, litière, molinie, écorce de feuillus.

L'écorce de résineux se singularise par une constante extrêmement faible.

Il est remarquable de constater que la majorité des extraits ont des constantes de l'ordre de grandeur de celle de l'acide citrique : il est donc vraisemblable que pour la majorité de ces extraits, l'essentiel du pouvoir complexant est à associer à la présence d'acides organiques aliphatiques. Cette détermination apporte une preuve supplémentaire à l'hypothèse attribuant un rôle primordial aux acides organiques hydrosolubles dans le phénomène de complexage se produisant dans les sols, rôle sur lequel de très nombreux auteurs ont déjà attiré l'attention (MILLER et OHLROGGE, 1958 ; KAURICHEV, IVANOVA et NODZDRUNOVA, 1963 ; NYKVIST, 1963 ; MUIR *et al.*, 1964 ; JACQUIN et BRUCKERT, 1965).

TABLEAU 3

*Constantes de stabilité* (log K) *des complexes formés entre le fer et les extraits aqueux de quelques végétaux*

| Végétal | $x$ | µg de fer complexé par 10 ml | (R) $\times 10^4$ | log K |
|---|---|---|---|---|
| Écorce de résineux | 0,73 | 75 | 0,97 | 5,7 |
| Écorce de feuillus | 1,23 | 254 | 5,57 | 9,3 |
| *Molinia coerulea* | 1,33 | 236 | 5,60 | 9,5 |
| Litière | 1,13 | 212 | 4,27 | 9,6 |
| Compost de champignon | 1,28 | 185 | 4,22 | 9,8 |
| Marcs de raisin | 1,37 | 139 | 3,40 | 10,4 |
| *Pt. aquilinum* | 1,33 | 139 | 3,30 | 11,4 |
| Tige de maïs | 1,73 | 302 | 9,32 | 13,0 |
| Foin de luzerne | 2,00 | 141 | 5,02 | 16,3 |
| Fumier de ferme | 2,30 | 316 | 12,97 | 16,7 |
| Paille de blé | 1,96 | 101 | 3,53 | 18,4 |
| Acide hydroxyl-éthyl éthylène diamine triacétique HEEDTA | | | | 19,6 |
| Acide éthylène diamine tétraacétique EDTA | | | | 25,1 |
| Acide 1-2 diamino cyclohexane tétraacétique DCTA | | | | 30,0 |
| Acide diéthylène triamine pentaacétique DTPA | | | | 28,6 |
| Acide éthylène diamino diortho-hydroxyl-phényl-acétique EDDHA | | | | 27,0 |
| Acide citrique | | | | 11,85 |

Le pouvoir complexant relativement élevé d'extrait de paille de blé, de fumier et, dans une moindre mesure, de tiges de maïs est intéressant à signaler : l'origine de ce caractère, commun à ces résidus qui sont tous très riches en silice et en dérivés de la cellulose, demanderait à être précisée.

Le faible pouvoir complexant des extraits d'écorce de résineux, pourtant très chargés en composés aromatiques, est à rapprocher de l'observation de LOSSAINT (1959) qui a constaté également que les extraits de feuillus sont beaucoup plus complexants que ceux des résineux.

### B. — *Pouvoir mobilisant des extraits aqueux*

Il serait logique de supposer que l'extrait aqueux qui complexe le plus le fer serait celui qui assurerait le mieux la mobilité et l'entraînement en profondeur du fer dissous. En d'autres termes, il peut être intéressant de voir s'il existe un parallélisme entre le pouvoir complexant d'extraits aqueux de débris de végétaux et l'action mobilisante de ces extraits. Tel est le but du dispositif expérimental décrit dans le chapitre relatif aux méthodes.

On a représenté dans le tableau 4 : d'une part, les constantes de stabilité de 7 extraits et, d'autre part, les quantités de fer entraînées hors des allonges par ces mêmes extraits dans des conditions expérimentales identiques.

TABLEAU 4

*Relation entre le pouvoir complexant et le pouvoir mobilisant des extraits aqueux*

| Végétal | Pouvoir complexant = log K | Pouvoir mobilisant = Fe mobilisé et recueilli dans le percolat (mg) |
|---|---|---|
| Écorce de résineux ... | 5,7 | 3,145 |
| Écorce de feuillus ..... | 9,3 | 3,775 |
| Litière ..... | 9,6 | 2,845 |
| Fougère ..... | 11,4 | 12,205 |
| Tiges de maïs ..... | 13,0 | 3,875 |
| Fumier de ferme ..... | 16,7 | 5,720 |
| Paille de blé..... | 18,4 | 7,220 |

Les résultats montrent d'une manière indiscutable qu'il n'est pas possible de relier systématiquement le pouvoir complexant des extraits à leur pouvoir mobilisant, bien que, dans cette expérience également, les extraits de fumier et de paille de blé se classent parmi les trois premiers. En fait, il a été clairement démontré par de nombreux auteurs et notamment par LOSSAINT (1959), BÉTRÉMIEUX et HÉNIN (1964), SCHALSCHA, LEVRINI et APPELT (1970), que l'action complexante d'extraits aqueux de résidus de végétaux ne constitue qu'une des composantes du pouvoir mobilisateur global de ces résidus vis-à-vis du fer ; il faut y ajouter en effet l'action réductrice, l'acidité titrable, la réadsorption des substances actives sur les colloïdes du sol et bien entendu, leur action spécifique sur le déclenchement des processus de fermentation microbienne.

## IV. — CONCLUSION

Le présent travail n'a pas d'autre prétention que de fournir une méthode et une technique susceptibles d'établir globalement un classement entre diverses sources de matières organiques que l'on peut rencontrer dans les sols, en ce qui concerne leur

pouvoir complexant vis-à-vis du fer ; il s'agit d'un classement qui ne tient compte ni de la structure chimique, ni de la concentration en substances complexantes contenues dans l'extrait aqueux. Bien que visant un objectif limité, l'application de cette méthode pourrait conduire à des applications pratiques comme celles permettant peut-être de faire un jugement de valeur précis sur les différents amendements organiques susceptibles d'être utilisés en agriculture en ce qui concerne leur pouvoir complexant. Elle peut aussi constituer la phase préliminaire d'une étude plus fine destinée à expliquer le fort pouvoir complexant de certains extraits aqueux comme cela semble être le cas pour le fumier et les tiges de céréales.

*Reçu pour publication en mai 1971.*

## SUMMARY

### DETERMINATION OF THE STABILITY CONSTANTS OF COMPLEXES FORMED BY IRON WITH SUBSTANCES PRESENT IN THE AQUEOUS EXTRACTS OF PLANT RESIDUES OF DIVERSE ORIGIN

Stability constants were determined for organometallic complexes formed by the interaction of iron and aqueous extracts of plant residues. This led to a general classification of the various sources of organic matter, according to their ability to absorb iron.

No direct or close relationship was found between the complexing capacity and mobilization capacity of aqueous extracts. This proves that their complexing action only constitutes one aspect of their overall mobilization capacity.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BESTIMMUNG DER STABILITÄTSKONSTANTE DER ZWISCHEN DEM EISEN UND DEN IN DEM WASSERHALTIGEN EXTRAKT VON PFLANZLICHEN RÜCKSTANDEN VERSCHIEDENEN URSPRUNGS ENTHALTENEN SUBSTANZEN GEBILDETEN KOMPLEXE

Die Bestimmung der Stabilitätskonstanten der metallorganischen Komplexe, die sich zwi chen dem Eisen und den wasserhaltigen Pflanzenrückständen bilden können, erlaubte einse zusammenfassende Klassifizierung zwischen den verschiedenen Quellen von organischen Stoffen, was ihre Sequestrationskapazität gegenüber dem Eisen anbetrifft, aufzustellen.

Es konnte keine enge und direkte Beziehung zwischen dem komplexierenden und dem mobilisierenden Vermögen der wasserhaltigen Extrakte festgestellt werden. Daraus wird geschlossen, dass ihre komplexierende Wirkung nur eine der Teilwirkungen ihres gesamten mobilisierenden Vermögens bildet.

## РЕЗЮМЕ

Определение постоянной прочности комплексов образующихся железом и веществами содержащимися в водной вытяжке из растительных остатков разного происхождения.

К. КУПРОН.

Определение прочности органо-металических комплексов образующихся железом и водными вытяжками из растительных остатков, позволило составить общую классификацию разных источников продукции органического вещества, по их способности секвестрировать железо.

Никакой тесной связи, или прямой зависимости не было обнаружено между комплексирующей и мобилизующей способностями водных экстрактов; а это доказывает что их комплексирующая сила является только одной из составных их общей мобилизирующей способности.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BÉTRÉMIEUX R., HÉNIN S., 1964. Artificial profile development by decomposition of plant material. *Experimental pedology*, 179-188, Hallsworth Crawford, Londres.

COURPRON C., 1967. Détermination des constantes de stabilité des complexes organo-métalliques des sols. *Ann. agron.*, **18**, 623-638.

JACQUIN F., BRUCKERT S., 1965. Identification et évolution des acides hydrosolubles de deux litières forestières. *C. R. Acad. Sci.*, **260**, 4556-4559.

KAURICHEV I. S., IVANOVA T. N., NODZDRUNOVA K. A., 1963. Low molecular organic acid content of water soluble organic matter in soils. *Soviet Soil Sci.*, 223-229.

LOSSAINT P., 1959. *Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières.* Thèse Strasbourg.

MARTELL E. A., CALVIN M., 1952. *Chemistry of metal chelate compounds.* Prentice Hall Inc., New York.

MILLER M. H., OHLROGGE A. J., 1958. Water-soluble chelating agents in organic materials. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 225-228 ; 228-231.

MUIR J. W., MORRISON R. I., BROWN C. J., LOGAN J., 1964. The mobilization of iron by aqueous extracts of plants. I. Composition of the amino-acid and organic acid fraction of an aqueous extract of pine needles. *J. Soil Sci.*, **15**, 220-225.

NYKVIST N., 1963. Leaching and decomposition of water soluble organic substances from types of leaf and needle litters. *Stud. For. Succ.*, 3-31.

SANDELL E. B., 1959. *Colorimetric determination of trace of metals.* Interscience Publishers Inc., New York.

SCHALSCHA E. B., LEVRINI C., APPELT H., 1970. Effect of synthetic and natural chelating agents on the mobilization of iron and aluminium in soils. *Agrochimica*, **14**, 178-187.

SCHUBERT J., 1948. Use of ion exchanges for the determination of physical chemical properties of substances, particularly radiotracers. *J. Phys. Coll. Chem.*, **52**, 340-350.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (5), 537-584.

# CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA CULTURE DE LA BETTERAVE A SUCRE SUR DES SOLS LÉGERS DU LAONNOIS ET DE LA CHAMPAGNE DE L'AISNE

R. GRAS, P.-L. OSTY, J.-P. DEFFONTAINES
et A. MARIN-LAFLÈCHE

avec la collaboration des autres membres du groupe
« Analyse et Synthèse » :
Y. HOUDARD, A. LANGLET, P. MILLEVILLE, A. MORISOT *

*Institut national de la Recherche agronomique*

## RÉSUMÉ

Une étude sur le comportement de la betterave sucrière dans des sols légers sur craie du département de l'Aisne a été réalisée par le groupe « Analyse et Synthèse ». Le but poursuivi est la détermination des causes des importantes irrégularités de rendement constatées.

La démarche envisagée est une analyse systématique par une méthode d'enquête des facteurs et des conditions de la culture de la betterave telle qu'elle est conduite dans le cadre des exploitations.

Les possibilités et les limites de cette approche sont discutées ; elles reposent principalement sur son caractère synthétique en ce sens qu'elle prend en compte un ensemble de variables susceptibles d'intervenir sur les niveaux de production. Elle met notamment en lumière l'intérêt de considérer simultanément les variables qualitatives et quantitatives, ce que permet le calcul de régression utilisé.

L'étude du comportement des plantes cultivées dans un milieu donné se rattache à l'autoécologie (1), qui nécessite une démarche particulière distincte de la juxtaposition des connaissances.

Une étude de ce genre a été effectuée dans l'Aisne par le groupe « Analyse

* R. GRAS, A. MORISOT, Station centrale d'Agronomie, section Sols, 78 - Versailles.
J.-P. DEFFONTAINES, Y. HOUDARD, P.-L. OSTY, Service d'Expérimentation et d'Information, 78 - Versailles.
A. MARIN-LAFLÈCHE, Station départementale d'Agronomie, 02 - Laon.
A. LANGLET, Station d'Agronomie, 31 - Toulouse.
P. MILLEVILLE, O. R. S. T. O. M.

(1) L'autoécologie étudie les rapports d'une seule espèce avec son milieu.

et Synthèse » sur la betterave sucrière, production pour laquelle ce département arrive au 1er rang avec 15 p. 100 de la production française. Elle s'est limitée aux sols légers du Laonnois et de la Champagne de l'Aisne, qui reposent sur une craie peu profonde. Dans ces sols, on constate d'importantes irrégularités du rendement qui restent inexpliquées.

La démarche retenue est une forme d'enquête, qui peut être considérée comme une monographie explicative qui conduit à un diagnostic.

L'analyse objective et systématique des facteurs et des conditions de la culture de la betterave a pour but de révéler les variables explicatives des disparités des rendements observés.

Cette analyse présente des avantages dûs principalement au fait qu'elle considère un ensemble de variables susceptibles d'intervenir sur les niveaux de production, sans privilégier *a priori* l'une ou l'autre d'entre elles. En ce sens, elle se rapproche d'une expérimentation sans intervention.

Cette démarche que l'on peut qualifier de synthétique, même s'il ne s'agit que de synthèses partielles, entraîne, par contre, des difficultés dues précisément au fait que les variables explicatives sont nombreuses, souvent liées entre elles et comportent des données qualitatives et quantitatives.

Cette étude présente un caractère expérimental ; son but est de mettre en lumière les possibilités et les limites d'une telle démarche.

## I. — CARACTÉRISTIQUES DES RÉGIONS DU LAONNOIS ET DE LA CHAMPAGNE DE L'AISNE

La zone d'étude recouvre deux régions naturelles : au sud-est, la Champagne de l'Aisne, au nord, le Laonnois.

Ces deux régions se différencient essentiellement par leurs caractéristiques pédologiques ; leurs caractéristiques climatiques peuvent être considérées comme homogènes.

### 1. 1. — *Pédologie* (d'après JAMAGNE, 1964)

*Dans la Champagne de l'Aisne*, les matériaux parentaux sont constitués par des produits d'altération de la craie. Suivant sa position dans le paysage, notamment, ce substrat crayeux se présente comme une craie en place, une grève crayeuse, un limon très calcarifère qui peut être, en période de sécheresse, induré en un véritable tuf. La présence en sous-sol d'une craie fortement diaclasée peut provoquer un drainage rapide. La réserve en eau, constituée au sein de la craie, se révèle comme non négligeable pour l'alimentation en eau des plantes.

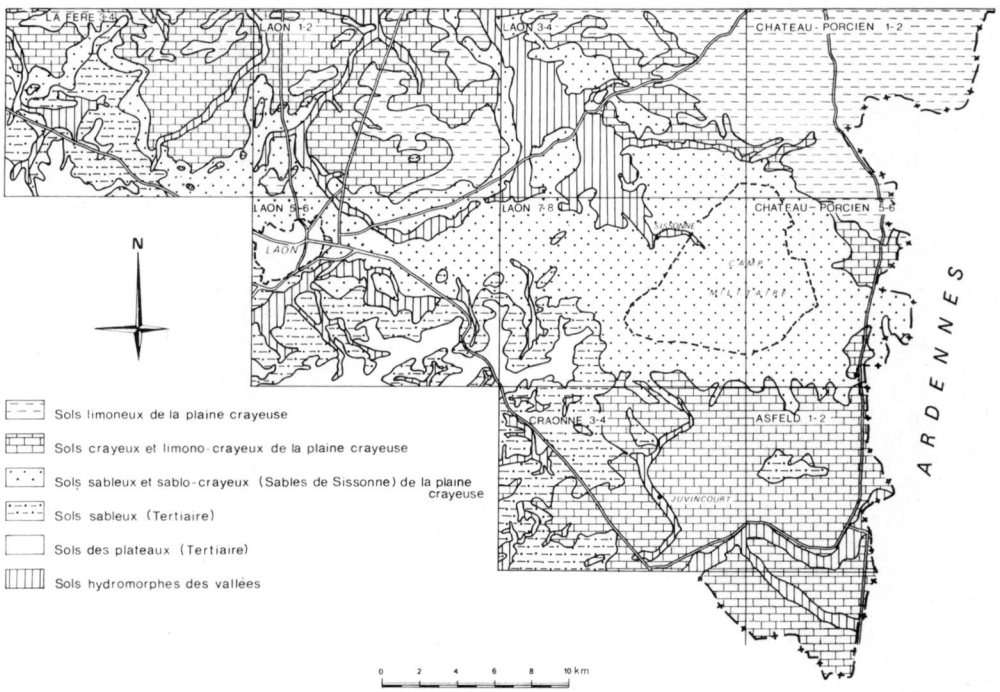
Sur la craie, se sont déposés des matériaux, sur une épaisseur variable, dont la texture est limoneuse à sableuse et riche en fragments calcaires.

*Dans le Laonnois*, la partie qui nous intéresse ici est constituée par la plaine crayeuse recouverte de limons hétérogènes. L'érosion a dégagé localement le substrat qui affleure (sommets, ruptures de pente).

A la limite entre le Laonnois et la Champagne de l'Aisne, existe une grande zone caractérisée par la présence d'un recouvrement sableux peu épais, appelé « Sables de Sissonne ».

La carte 1, dressée par le Service de Cartographie de l'Aisne (MAUCORPS) donne le schéma des principaux groupements des sols du Laonnois et de la Champagne de l'Aisne.

**SCHEMA DES PRINCIPAUX GROUPEMENTS DE SOLS DU LAONNOIS ET DE LA CHAMPAGNE DE L'AISNE**




CARTE 1

Au sein de cet ensemble de sols, nous avons choisi d'étudier les sols caractérisés par :

— une texture légère de l'horizon travaillé : limon moyennement sableux (LMS) ; sable (S) ; sable limoneux (SL) ; sable argileux (SA) ;

— une craie peu profonde, entre 15 et 50 cm environ.

### 1. 2. — *Climatologie*

#### 1. 21. *Caractéristiques de l'année moyenne et de 1969.*

Dans l'ensemble, la zone est soumise à un climat humide et frais avec certaines années de sécheresse exceptionnelle et de froids rigoureux. L'insolation moyenne, assez faible, est à Laon de 1 600 heures par an.

Pour l'année de l'étude, on considère la période intéressant l'ensemble de la culture de la betterave, depuis les premiers travaux entrepris pour cette culture jusqu'à la fin du cycle végétatif, c'est-à-dire du 1er octobre 1968 au 1er octobre 1969.

Les données retenues sont fournies par la Station agronomique de l'Aisne.

Les figures 1, 2, 3, 4, montrent les valeurs moyennes de la pluviométrie, de l'évapotranspiration, des déficits climatiques et des températures mensuelles. Par comparaison on peut faire les observations suivantes sur l'année 1969 :

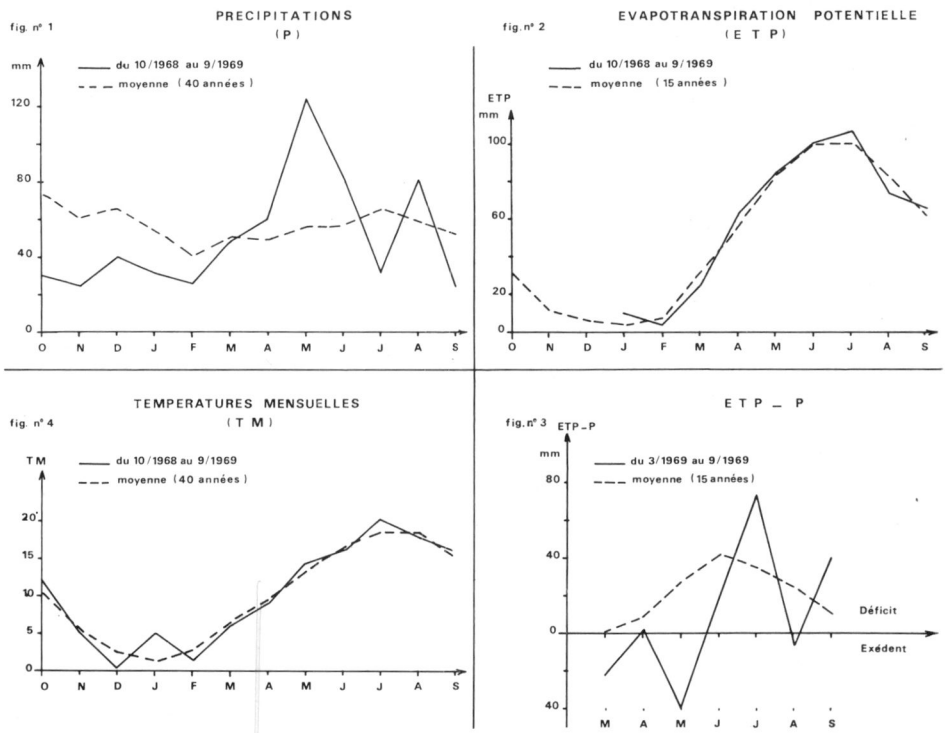



FIG. 1, 2, 3, 4. — *Pluviométrie, évapotranspiration, déficits climatiques et températures mensuelles*
(valeurs moyennes et année 1969)

Les *précipitations*, d'octobre à février inclus, présentent un déficit de 124 mm, et de mars à juin inclus, un excédent de 126 mm ; juillet et septembre sont très secs. Les *températures* sont très élevées en juillet ; décembre est froid et septembre chaud. L'*évapotranspiration* présente peu d'écart par rapport aux moyennes.
Le *déficit climatique* apparaît au mois d'avril en année moyenne ; en 1969, il est nul jusqu'en juin et prend des valeurs importantes en juillet et septembre.

Pour une réserve en eau du sol de 50 mm, le déficit réel, en année moyenne, est de 96 mm et commence en juin ; en 1969 il n'est que de 75 mm (41 mm en juillet et 34 mm en septembre). Pour une réserve de 100 mm le déficit en année moyenne est de 46 mm (début en juillet) ; en 1969 il est de 25 mm et n'apparaît qu'en septembre.

1. 22. *Incidences du climat de l'année sur les conditions de culture.*

Une analyse détaillée de la climatologie de l'année met en relief certains effets possibles du climat sur l'exécution des différents travaux et sur la végétation de la betterave.

Les labours ont été effectués en majorité pendant une période peu pluvieuse (automne et hiver). Ceux qui ont été faits avant le 30 décembre ont subi l'action des deux principales périodes de gel (du 30 décembre au 3 janvier et du 13 au 18 février).

Au moment de la reprise des labours, les sols avaient une humidité voisine de

la capacité du champ, ce qui a pu augmenter les risques de compactages ou de lissages.

La préparation des terres et les semis se sont effectués principalement au cours des deux périodes sans pluies notables allant du 20 au 31 mars par temps froid (3 à 4°), et du 4 au 10 avril avec une température plus élevée. La levée des betteraves a été lente pour les semis réalisés au cours de la première période, plus rapide pour ceux de la deuxième.

L'abondance des pluies en mai a eu une incidence variable sur l'efficacité des désherbants suivant la date de leur épandage, la perméabilité des sols et le mode d'application (incorporation plus ou moins profonde).

En général, le climat de l'année a été très favorable à la culture de la betterave ; la température, supérieure à la moyenne, et la répartition des pluies ont permis un développement continu de la végétation, les déficits en eau ne se manifestant qu'en fin de cycle. Les précipitations pendant la croissance de la betterave ont vraisemblablement réduit les effets des périodes sèches habituelles, notamment sur les sols peu profonds.

## 2. — MÉTHODOLOGIE

### 2. 1. — *Échantillonnage*

L'enquête, qui se propose d'étudier simultanément les variables intervenant sur la production, nécessite la collecte de données concernant la plante, le milieu (climat, sol) et les techniques culturales.

L'hétérogénéité assez générale des champs examinés du point de vue des sols et des variétés notamment (carte 2), nous a conduit à mesurer nous-mêmes le rendement sur une petite surface appelée « station », plutôt que d'utiliser l'évaluation du rendement de tout le champ par la pesée géométrique.

L'enquête a donc porté sur un échantillon de stations.

L'étude d'un grand nombre de variables nécessite un échantillon le plus grand possible. Les moyens disponibles en temps et enquêteurs sont limités, ce qui impose un compromis, car si on enregistre le maximum de données, c'est au détriment du nombre de stations et inversement.

L'enregistrement des données, quoique non exhaustif, vise à retenir celles pouvant contribuer à « l'explication » des variables à expliquer, quitte à limiter éventuellement leur gamme de variation (choix *a priori* de types de sols, de variétés...) : les fiches d'enregistrement reproduites en annexe indiquent les données qui ont été collectées.

Celles-ci étant définies, on a étudié le maximum de stations (objectif = 80, utilisables = 75), le but étant d'avoir un échantillon représentatif des facteurs et conditions du rendement concernés par l'étude, et d'éviter les inconvénients d'un effectif trop faible (sécurité statistique).

L'échantillonnage a été fait en deux temps. Nous avons choisi d'abord les « sous-parcelles », une sous-parcelle étant une partie de parcelle ou de champ définie par l'intersection des ensembles déterminés par les contraintes ci-dessous :

— porter en 1969 une des variétés de betteraves retenues. En effet, une centaine de variétés de betteraves sucrières existent, mais l'expérience prouve qu'une dizaine seulement sont plus communément rencontrées ;
— être réparties assez régulièrement dans la région étudiée ;
— être sur des sols à texture légère (sable et limon moyen sableux) sur craie peu profonde (15 à 50 cm) ;
— être situées chez des agriculteurs susceptibles de fournir l'ensemble des renseignements indispensables.

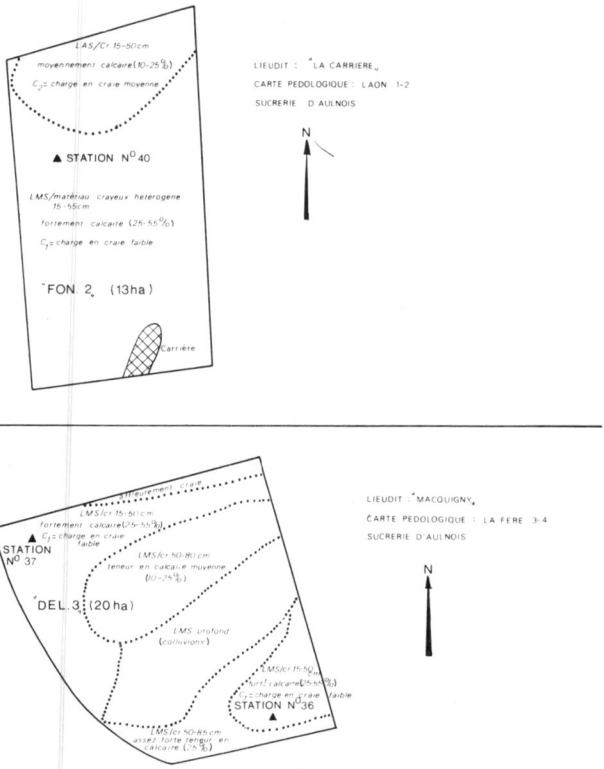
Dans ces sous-parcelles nous avons choisi les stations.

### 2. 11. *Choix des sous-parcelles.*

Du point de vue pratique, le choix des sous-parcelles s'est fait de la façon suivante :

Choix des exploitants : la consultation du fichier de la Station agronomique de l'Aisne nous a permis d'obtenir une liste d'agriculteurs susceptibles de participer à l'étude et ayant une grande

**SCHEMA DE LA PARCELLE "FON. 2" AVEC REPARTITION DES UNITES DE SOLS**
**(d'après la carte des sols de l'Aisne au 1/25000)**
Exemple de parcelle assez homogène




**SCHEMA DE LA PARCELLE "DEL.3" AVEC REPARTITION DES UNITES DE SOLS**
**(d'après la carte des sols de l'Aisne au 1/25000)**
Exemple de parcelle hétérogène

CARTE 2

chance, d'après la carte pédologique, d'avoir des parcelles en betteraves sur les types de sol retenus.

Après contact téléphonique, nous avons ainsi disposé d'une liste d'agriculteurs intéressés par l'étude et ayant des betteraves sur des terres crayeuses.

Choix des parcelles : une visite chez l'exploitant nous a permis de repérer sur la carte des sols toutes les parcelles en betteraves sucrières l'année de l'étude et de remplir un questionnaire rapide sur les techniques utilisées et les anomalies constatées.

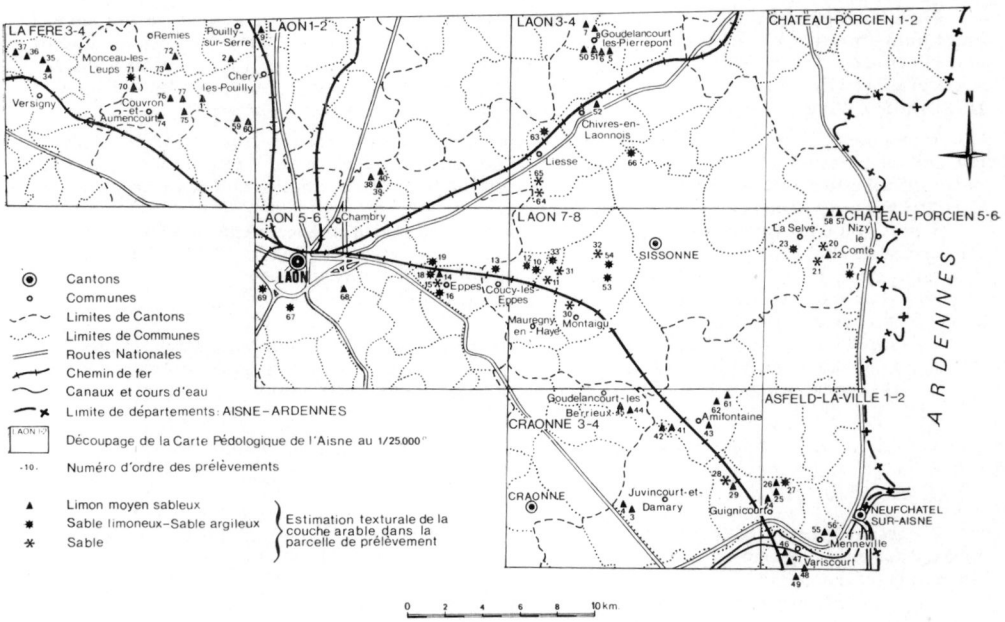
Choix des sous-parcelles : au moyen du questionnaire et de la carte des sols sur laquelle étaient indiquées les parcelles, nous avons dressé une liste de sous-parcelles répondant le mieux à nos objectifs. Nous nous sommes fixés un maximum de 3 parcelles par exploitant, et à l'intérieur de chaque parcelle un maximum de 2 sous-parcelles, sinon nous aurions donné un poids trop important aux particularités éventuelles de certaines exploitations.

La carte 3 et les graphiques 5 et 6 donnent un aperçu des caractéristiques de l'échantillon retenu.

2. 12. *Dimensions et choix de la station.*

On a considéré la sous-parcelle afin de disposer d'une surface plus homogène que la parcelle, puisque le type de sol et la variété y sont les mêmes. Malgré tout, les caractéristiques de ce type

## CARTE DE SITUATION DES PRELEVEMENTS




CARTE 3

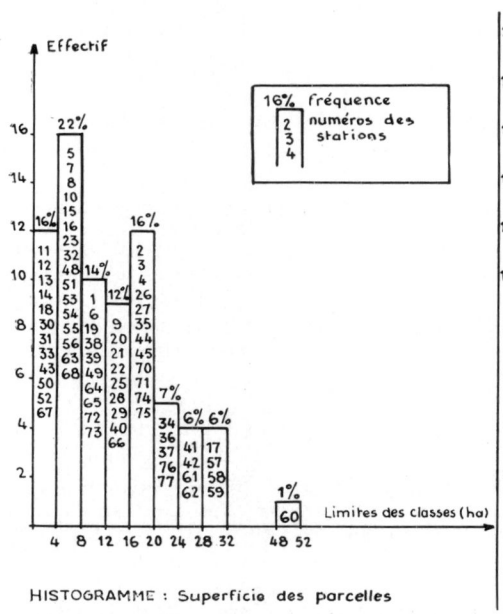



FIG. 5.

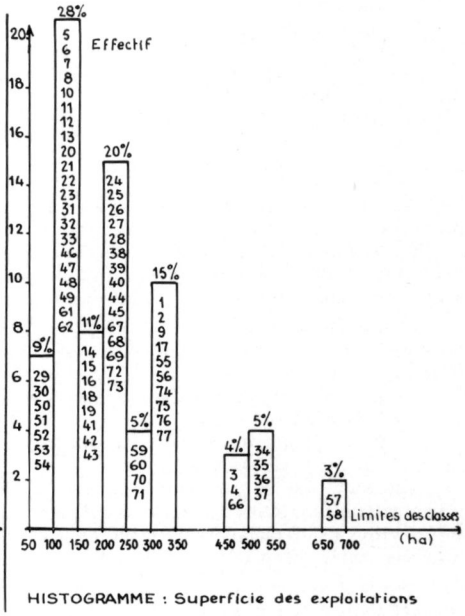



FIG. 6.

de sol peuvent présenter une certaine dispersion dans la sous-parcelle. De ce fait, l'étude des relations milieu-technique-plante doit porter sur une surface plus réduite que la sous-parcelle, c'est la station. L'idéal serait une station quasi ponctuelle qui limiterait l'étude de la végétation aux abords immédiats de la zone d'étude du sol.

Mais il faut disposer d'un nombre suffisant de betteraves, tant pour évaluer le rendement (minimum à fournir à la sucrerie), que pour « tamponner » l'incidence de perturbations inévitables non contrôlées. De ce dernier point de vue il paraîtrait souhaitable de disposer d'une surface assez grande, mais on court le risque d'étudier des betteraves ayant poussé sur un sol un peu différent de celui qui est caractérisé par le profil situé au centre de cette surface.

Finalement, le compromis s'est fait sur la base d'un quadrilatère (en gros un carré) constitué par une longueur de 4 m prise sur 8 rangs côte à côte. Ce périmètre, facile à déterminer, a délimité notre intervention et évité tous dégâts dans le reste de la parcelle, notamment pour ne pas gêner le contrôle de rendement par pesée géométrique.

La station n'est certainement pas représentative de la sous-parcelle, ce que nous ne cherchons pas à obtenir.

Ceci étant, sur le terrain, le choix de la station se déroule ainsi :

— reconnaissance sommaire des limites de la sous-parcelle ;
— élimination des fourrières ;
— dans la zone ainsi définie, localisation du centre de la station au point de chute d'un objet lancé au hasard. Le jet a été recommencé si le premier impact désignait un vide dû à un accident tel que manque de semoir ou déport de bineuse.

### 2. 2. — *Collecte des données au champ* (du 15 au 24 septembre 1969)

#### 2. 21. *Étude de la végétation.*

La station (ainsi que le montre la « fiche terrain » en annexe) a d'abord été notée sommairement vis-à-vis de quatre caractéristiques : propreté, maladies (surtout cercosporiose), coloration du feuillage, maturité.

Cette notation visait plus à contrôler la présence de circonstances particulières, du type adventices ou parasitisme, qu'à fournir des bases d'études de ces phénomènes.

En ce qui concerne la récolte proprement dite, un échantillon de betteraves a été constitué en prélevant une betterave sur quatre, c'est-à-dire les betteraves de numéro d'ordre 1, 5, 9... Les mesures ont porté :

— sur le peuplement ;
— sur les caractéristiques apparentes des betteraves : tri et comptage des betteraves non marchandes, des betteraves fourchues et des betteraves atteintes de cœur noir.

Pour des raisons de temps et d'homogénéité entre les notations, n'ont pas été notées les anomalies de la répartition des betteraves sur la ligne, ni les différenciations plus fines de morphologie (classes de calibres, betteraves racineuses).

— par la suite, sur le poids moyen et la richesse en sucre des betteraves marchandes prélevées.

#### 2. 22. *Étude du sol.*

Au centre de la station, on a creusé une tranchée perpendiculairement aux rangs de façon à obtenir un profil cultural intéressant 5 betteraves chacune sur 1 rang différent.

Cette dimension, qui laisse parfois intervenir des variations de la cote du substrat notamment, permet par contre de limiter l'incidence de la dimension des outils : un profil limité à 1 ou 2 rangs serait trop tributaire de la localisation, inconnue *a priori*, des passages de roues.

L'examen du profil cultural, effectué classiquement, a été enregistré sous forme d'une description. L'accent a été mis sur les éléments de la situation pouvant être en relation avec l'état du végétal, et en particulier :

— les discontinuités texturales (profondeur de la craie) ;
— les cailloux ;
— les particularités structurales (lissages, zones compactes) ;
— les lits de paille et de fumier.

Élément plus original, on a dessiné à l'échelle les 5 betteraves observées, avec figuration schématique des traits majeurs de l'état du sol avoisinant (cf. annexe). Ceci a permis d'obtenir ultérieurement les éléments d'une étude particulière des profils : section des betteraves, fourchage, aire des zones compactées, cailloux.

Des prélèvements de terre ont été faits en vue de déterminations, soit systématiques (teneur en carbonates, textures) soit limitées à certaines stations (teneur en bore, stabilité structurale, granulométrie).

### 2. 3. — *Collecte des données techniques*

Tout questionnaire en vue d'une enquête est un compromis entre le maximum de renseignements à obtenir et les possibilités de l'agriculteur d'y répondre avec précision et rapidité.

Le questionnaire auquel ont répondu les agriculteurs portait sur les principales techniques culturales et en particulier sur la liste détaillée et la date d'utilisation des instruments depuis la récolte de la culture précédente.

Un exemple de « fiche technique » remplie par un agriculteur est donné en annexe.

### 2. 4. — *Principe du dépouillement*

L'explication des variations du rendement, qui doit revêtir une forme synthétique, est précédée de deux phases.

La première phase consiste à rechercher pour certaines données une expression convenable à leur étude. Beaucoup de données peuvent être utilisées telles quelles, ce sont par exemple l'apport des différents engrais, les précédents culturaux. Par contre, il ne paraît pas souhaitable d'utiliser de façon indépendante des données telles que les types de matériel utilisés au cours de chaque phase de préparation du sol : on substitue aux variables types d'outils utilisés à chaque étape, une variable unique définie par la séquence des outils utilisés pour l'ensemble de la préparation. Comme nous le verrons plus tard, cette variable est beaucoup plus facilement interprétable au point de vue agronomique. L'élaboration de telles variables synthétiques nécessite une première analyse de questions telles que la préparation des terres à betteraves et la caractérisation du profil par des indices.

La phase suivante, qui consiste à dépouiller l'enquête de façon simple, est essentielle parce qu'elle permet de se familiariser avec l'ensemble des données et avec leurs liaisons éventuelles deux à deux. Ce dépouillement simple consiste essentiellement à examiner :

— la distribution des variables quantitatives,

— les fréquences correspondant aux différents états des variables qualitatives,

— les liaisons deux à deux existant entre les variables.

Ainsi on est en mesure de proposer dans de meilleures conditions des hypothèses pour étudier de façon globale les variations de rendement (équation de régression multiple par exemple), et de fournir une meilleure interprétation de cette étude synthétique. On peut en outre déceler les erreurs ou inexactitudes qui ont pu se glisser lors de la collecte des données ou de certains calculs préparatoires.

L'étude synthétique se fait ici au moyen d'un modèle mathématique dont l'originalité consiste à traduire dans la même expression l'influence des variables qualitatives et quantitatives. Aussi donnons-nous quelques indications sur ce modèle (Boudon, 1967 ; Anon.).

Soit par exemple un rendement $y$, dépendant linéairement de la durée de végétation $x$ (variable quantitative) et du sol (variable qualitative) qui peut prendre 3 modalités, notées 1, 2 et 3.

Cette relation peut s'écrire au moyen des 3 équations :

$$y_1 = ax + \mu_1 \quad \text{avec sol 1} \qquad (1)$$
$$y_2 = ax + \mu_2 \quad \text{avec sol 2} \qquad (2)$$
$$y_3 = ax + \mu_3 \quad \text{avec sol 3} \qquad (3)$$

Le principe du modèle mathématique est donc d'exprimer l'effet de la variable qualitative « sol » par des valeurs différentes du terme constant de l'équation de régression, ce qui se représente géométriquement par 3 parallèles d'ordonnées à l'origine $\mu_1$, $\mu_2$ et $\mu_3$ (fig. 7 *a*).

L'ensemble des équations (1), (2) et (3) peut être représenté par l'équation :

$$y = ax + b_{11}\,u_1 + b_{12}\,u_2 + b_{13}\,u_3 + \mu$$

avec les conventions :

$$\mu_1 = \mu + b_{11}\,u_1 \quad \text{avec : } u_1 = 1,\ u_2 = u_3 = 0 \text{ pour sol 1}$$
$$\mu_2 = \mu + b_{12}\,u_2 \quad \text{— : } u_2 = 1,\ u_1 = u_3 = 0 \text{ pour sol 2}$$
$$\mu_3 = \mu + b_{13}\,u_3 \quad \text{— : } u_3 = 1,\ u_1 = u_2 = 0 \text{ pour sol 3}$$

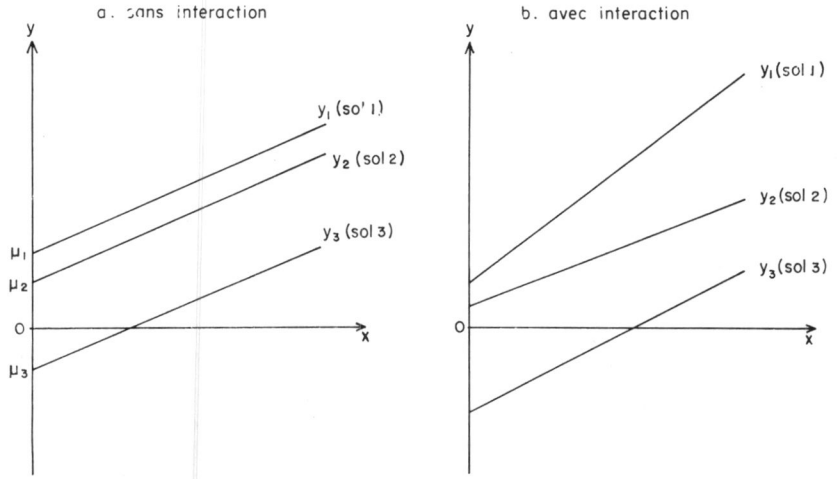



FIG. 7. — *Schéma de principe du modèle mathématique*
*Effets d'une variable quantitative* ($x$) *et d'une variable qualitative* (sol)

On retrouve bien en effet que pour le sol 2 par exemple :

$$u_2 = 1,\ u_1 = u_3 = 0\ *$$
$$y_2 = ax + b_{12}u_{12} + \mu = ax + \mu_2$$

L'équation générale a la forme d'une équation de régression linéaire, d'où le nom *d'hypothèse linéaire généralisée à la prise en compte des facteurs qualitatifs* donné à cette méthode.

Cette hypothèse permet, et c'est là tout l'intérêt de la forme d'équation qu'elle implique, de calculer l'ensemble des coefficients $b_i$ par la méthode des moindres carrés. Indiquons aussi, sans le démontrer, que ce calcul nécessite la contrainte supplémentaire $\Sigma b_i = 0$, c'est-à-dire que la somme des coefficients d'une variable qualitative est nulle.

L'expression peut se *généraliser* au cas de plusieurs variables quantitatives et qualitatives. Par exemple :

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \underbrace{b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + b_{13}u_3}_{\text{facteur à 3 modalités}} + \underbrace{b_{21}v_1 + b_{22}v_2}_{\text{facteur à 2 modalités}} + \mu$$

L'établissement d'une telle expression nécessite le calcul d'autant de coefficients de régression ($a_i$ et $b_j$) qu'il y a de variables quantitatives et de modalités des variables qualitatives : par exemple s'il y a 2 variables quantitatives et deux variables qualitatives, l'une avec 3 modalités, l'autre avec 2, le calcul revient à celui d'une régression à 7 variables (2 + 3 + 2), alors qu'il n'y a que 4 variables explicatives (et ceci lorsqu'on n'étudie pas les interactions).

Comme dans une régression ordinaire, on peut évaluer la part de variance de la variable $y$ « expliquée » par la liaison avec une variable, $x_2$ par exemple.

* Remarquons que pour obtenir la valeur du coefficient $b$, on peut multiplier un vecteur état « $b$ » par une matrice uniligne traduisant un code binaire :

vecteur état : $\begin{vmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{13} \end{vmatrix}$

| Sol | Code binaire |
|---|---|
| 1 | 100 |
| 2 | 010 |
| 3 | 001 |

exemple : pour le sol 3, valeur du code : 001

produit matriciel $|001| \cdot \begin{vmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{13} \end{vmatrix} = b_{13}$

A cet effet on calcule la variance résiduelle $V_R$ résultant du calcul du modèle avec toutes les variables et la variance résiduelle $V'_R$ calculée lorsqu'on a éliminé $x_2$.

On teste l'hypothèse nulle $H = V_R - V'_R = 0$ ; son rejet revient à admettre que $x_2$ intervient sur $y$.

Pour évaluer l'influence de la variable $u$, par exemple, on calcule après élimination de $u$ la variance résiduelle $V''_R$ ; ceci revient à admettre : $b_{11} = b_{12} = b_{13} = 0$. On teste à nouveau $V_R - V''_R = 0$

Dans le programme que nous avons utilisé, on obtient l'équation comportant seulement les variables qui contribuent à l'explication de $y$ à un seuil de probabilité donné ; lorsque plusieurs modalités d'une variable qualitative n'ont pas d'effet significativement différent sur $y$, au seuil considéré, ces modalités sont regroupées en une seule.

Comme la régression multiple classique, ce modèle présente des difficultés d'interprétation dues aux liaisons entre variables explicatives (DEFFONTAINES et GRAS, 1968).

Le modèle permet de traduire une *interaction* entre variables qualitative et quantitative ; par exemple pour 2 variables $x$ et $u$ avec une interaction entre $x$ et $u$, l'équation générale devient :

$$y = (a + d_1u_1 + d_2u_2 + d_3u_3)\, x + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + b_{13}u_3 + \mu$$

Le coefficient de régression de $x$ varie avec les modalités de $u$ (modalité 1 : $a + d_1 u_1$ ; modalité 3 : $a + d_3 u_3$). Aux diverses modalités de $u$ correspondent des droites qui sont différentes entre elles à la fois par leurs ordonnées à l'origine et leurs pentes (fig. 7 *b*).

On peut aussi représenter une interaction entre variables qualitatives :

soit la variable $u$ avec les modalités $u_1$, $u_2$, $u_3$
— — $v$ — $v_1$, $v_2$

On crée une nouvelle variable $w$ définie par la combinaison des modalités de chaque variable $u$ et $v$ :

$$\begin{array}{l} w_1 = (u_1, v_1) \\ w_2 = (u_1, v_2) \\ w_3 = (u_2, v_1) \\ w_4 = (u_2, v_2) \\ w_5 = (u_3, v_1) \\ w_6 = (u_3, v_2) \end{array} \qquad \text{vecteur état : } \begin{vmatrix} d_{11} \\ d_{12} \\ d_{13} \\ d_{14} \\ d_{15} \\ d_{16} \end{vmatrix}$$

L'équation générale s'écrit :

$$\begin{aligned} R = {} & a_1x_1 + a_2x_2 + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 + b_{13}u_3 + b_{21}v_1 + b_{22}v_2 \\ & + d_{11}w_1 + d_{12}w_2 + d_{13}w_3 + d_{14}w_4 + d_{15}w_5 + d_{16}w_6 + \mu \end{aligned}$$

Pour tester l'interaction, on compare les variances résiduelles respectives du modèle complet et du modèle sans interaction, c'est-à-dire dans lequel :

$$d_{11} = d_{12} = d_{13} = d_{14} = d_{15} = d_{16} = 0$$

## 3. — PRÉSENTATION ET CHOIX DES VARIABLES

### 3. 1. — *Présentation des variables*

#### 3. 11. *Le rendement et les caractéristiques du végétal.*

Le rendement et ses composantes, indiqués dans le tableau 1, correspondent à une station de 4 × 3,60 m ; pour les rapporter à 1 hectare, le coefficient multiplicateur est 10 000/14,4.

#### 3. 12. *Les caractéristiques du sol.*

En ce qui concerne le *substrat*, dont les faciès sont très variables (craie, limon calcarifère...) et les limites parfois difficiles à préciser, on s'est borné à définir une

TABLEAU I

*Rendement et caractéristiques du végétal*

| Variables | Moyennes | Écart-types | N° histogramme |
|---|---|---|---|
| Poids de sucre (kg) ..... | 9,78 | 2,67 | 8 |
| Nombre de betteraves marchandes ..... | 109,9 | 25,5 | 9 |
| Poids moyen d'1 betterave marchande (g) ... | 581,9 | 154,5 | 10 |
| Poids de betteraves marchandes (kg) ..... | 61,6 | — | — |
| Richesse saccharine (% poids) ..... | 15,8 | 0,8 | 11 |
| Betteraves fourchues (% marchandes) ..... | 25,6 | — | 12 |
| Petites betteraves (% nombre total) ..... | 6,9 | — | 13 |
| Atteintes de cœur noir (% marchandes) ..... | 13,0 | — | 14 |

variable « *profondeur de la craie* » qui est la cote d'apparition de la craie ou d'un horizon plus crayeux (moyenne : 45 cm ; écart-type : 20 cm).

*L'horizon travaillé* est caractérisé de plusieurs façons :

— la *texture*, appréciée au doigt sur la terre fine présente 5 modalités (tabl. 2) :

TABLEAU 2

*Modalités de la texture*

| N° modalité | Texture | Symbole | Nombre de stations |
|---|---|---|---|
| 1 | Limon moyennement sableux | LMS | 47 |
| 2 | Limon argilo-sableux | LAS | 1 (pour mémoire) |
| 3 | Sable (sens strict) | S | 10 |
| 4 | Sable limoneux | SL | 14 |
| 5 | Sable argileux | SA | 3 |

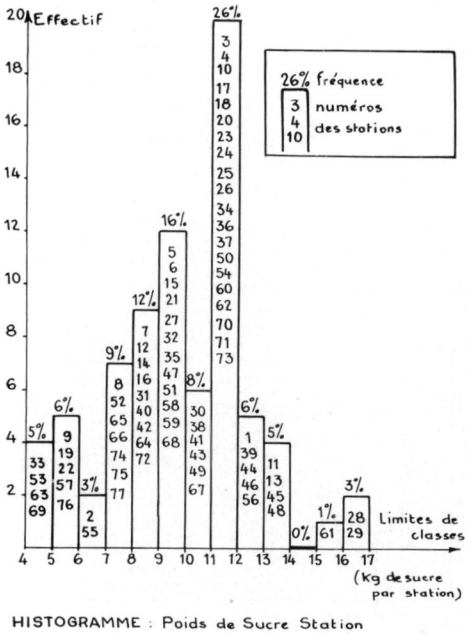
Quelques analyses de contrôle montrent que les catégories texturales, particulièrement les limons moyennement sableux, recouvrent des granulométries hétérogènes (tabl. 3).

— l'appréciation visuelle du volume de cailloux dans l'horizon travaillé permet de définir le *taux de cailloux* (moyenne : 13,2 p. 100).

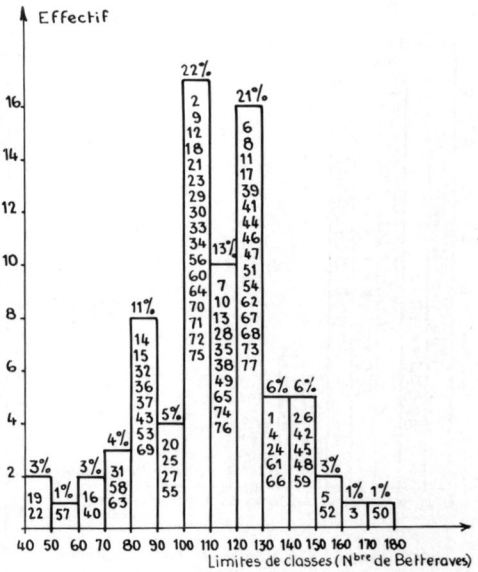
— au laboratoire, on a déterminé la teneur pondérale en $CaCO_3$ de la terre fine, appelée *taux de calcaire* (moyenne : 23,1 p. 100).

— l'état structural de chaque profil a été caractérisé par un indice global de *compacité* (rapport de la surface compacte à la surface totale du profil) et de fréquence des zones lissées (notée de 0 à 2).

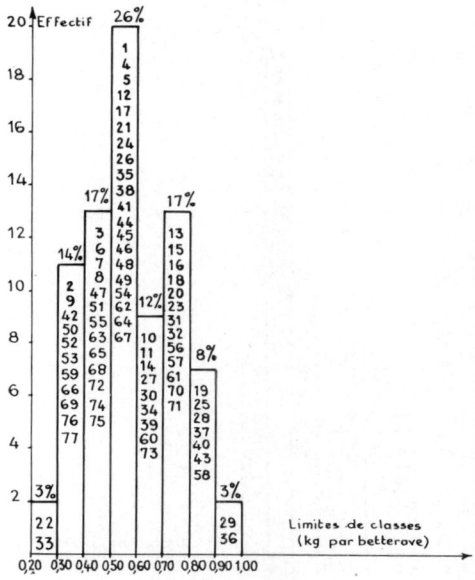
— enfin n'apparaissent pas ici certaines notations de profil destinées à contrôler ou à mieux interpréter d'autres caractéristiques (couleur pour la texture, humidité pour la cohésion).



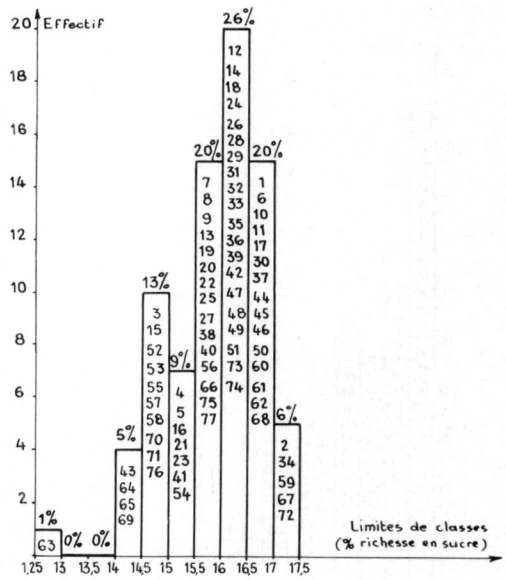

HISTOGRAMME : Poids de Sucre Station




HISTOGRAMME : Nombre de Betteraves/Station (Marchandes)




HISTOGRAMME : Poids moyen d'une betterave



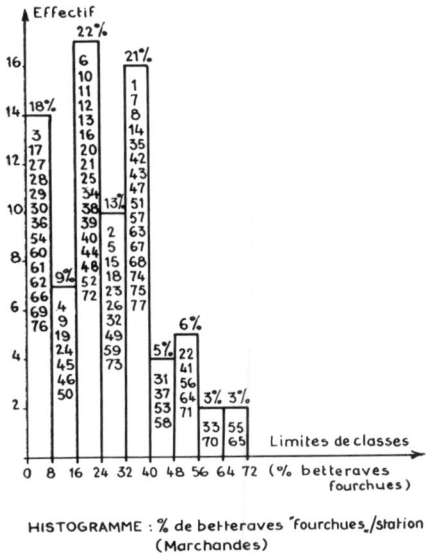

HISTOGRAMME : Richesse Saccharine

FIG. 8. — *Poids de sucre/station*

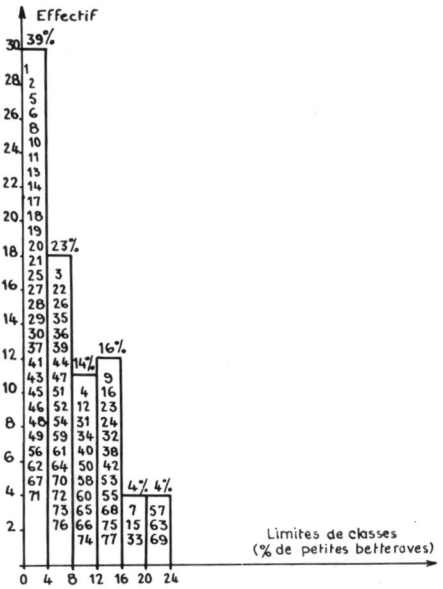
FIG. 9. — *Nombre de betteraves/station* (marchandes)

FIG. 10. — *Poids moyen d'une betterave*

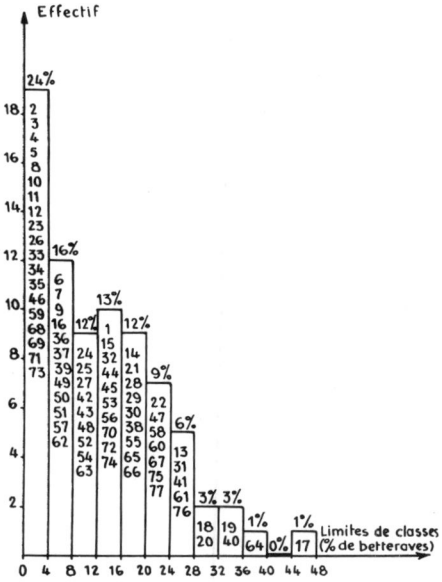
FIG. 11. — *Richesse saccharine*



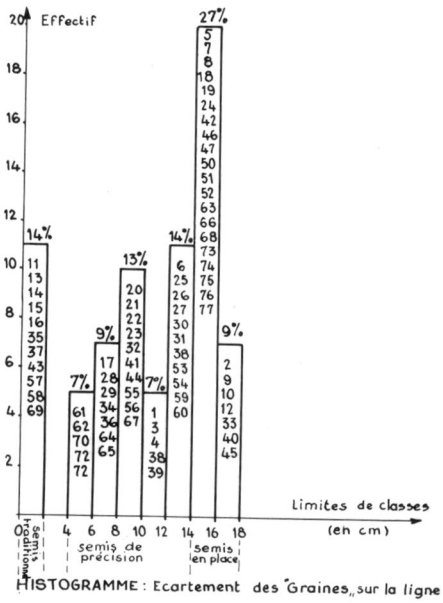

HISTOGRAMME : % de betteraves "fourchues"/station (Marchandes)




HISTOGRAMME : % de Betteraves /Station (Non marchandes)




HISTOGRAMME : % de Betteraves marchandes atteintes de "Cœur noir" /station




HISTOGRAMME : Ecartement des "Graines" sur la ligne

FIG. 12. — *P. 100 de betteraves fourchues marchandes/station*

FIG. 13. — *P. 100 de betteraves non marchandes/station*

FIG. 14. — *P. 100 de betteraves marchandes atteintes de Cœur noir/station*

FIG. 15. — *Écartement des graines sur la ligne*

TABLEAU 3

*Caractéristiques physiques de quelques sols*

| N° | Texture | MO % | 0-2μ % | 2-20μ % | 20-50μ % | 50-200 μ % | 200-2 000 μ % | log 10 S | log 10 K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | LMS | 2,39 | 24,1 | 20,2 | 7,3 | 25,8 | 16,4 | 1,23 | — |
| 7 | | 1,87 | 19,5 | 24,7 | 30,5 | 14,9 | 3,7 | 1,74 | — |
| 24 | | 1,19 | 23,2 | 20,2 | 6,1 | 19,9 | 25,3 | 1,43 | — |
| 20 | S | 1,11 | 6,8 | 4,9 | 4,7 | 68,0 | 12,5 | — | 2,38 |
| 21 | | 1,08 | 8,0 | 4,6 | 4,3 | 67,9 | 11,8 | — | 2,11 |
| 10 | SL | 1,78 | 10,1 | 3,2 | 1,4 | 68,9 | 11,9 | — | 2,32 |
| 71 | | 1,46 | 12,2 | 13,1 | 22,8 | 44,7 | 3,1 | 2,04 | 1,59 |
| 19 | SA | 1,59 | 13,1 | 6,9 | 8,0 | 54,8 | 10,3 | — | 1,82 |

3. 13. *Les caractéristiques techniques.*

Les *données quantitatives* concernent :

— la *distance* entre graines (fig. 15) indiquée par l'exploitant ;
— la *date de semis*, exprimée par le nombre de jours la séparant de la date du premier semis (7 mars), auquel on a donné la valeur 1 ; le semis le plus tardif (6 mai) prend ainsi la valeur 60 ;

TABLEAU 4

*Fumure minérale* (Kg/ha)

| Éléments fertilisants | Moyennes | Écart-types | Doses extrêmes |
|---|---|---|---|
| N | 200,6 | 44,6 | 112-287 |
| P | 178,0 | 40,2 | 84-275 |
| K | 203,1 | 57,1 | 104-430 |

— la *durée de la végétation*, définie par l'écart en jours entre la date du semis et la date du prélèvement (moyenne : 168,5 ; écart-type : 12,2) ;
— la *fumure minérale*, limitée ici aux rapports en N, P et K (tabl. 4) ; l'apport de bore n'apparaissant pas lié à la fréquence de la maladie du cœur noir, n'a pas été retenu.

Les *données qualitatives*, les plus nombreuses, sont regroupées dans le tableau 5.

TABLEAU 5

*Données techniques qualitatives*

| Variables | Modalités | Indice | Effectif | |
|---|---|---|---|---|
| Précédent cultural | Blé | 1 | 43 | |
| | Orge | 3 | 16 | |
| | Escourgeon | 2 | 10 | |
| | Ray-Grass | 4 | 2 | 5 |
| | Betterave | | | |
| | Carotte | | 2 | |
| | Seigle | | 1 | |
| Paille du précédent | Enlevée | 0 | 17 | |
| | Enfouie | 1 | 54 | |
| Engrais vert | Présence colza | 1 | | 23 |
| | Présence moutarde | 2 | | |
| | Présence siletta | 3 | | |
| | Absence | 0 | 52 | |
| Fumier | Présence | 1 | 23 | |
| | Absence | 0 | 52 | |
| Apport de Bore | Présence | 1 | 31 | |
| | Absence | 0 | 44 | |
| Désherbage chimique | Présence localisé | — | 30 | 64 |
| | Présence généralisé | — | 34 | |
| | Absence | — | 11 | |
| Désinfection du sol | Présence localisé | — | 41 | 50 |
| | Présence généralisé | — | 9 | |
| | Absence | — | 25 | |
| Variétés | *Zwannesse* | 3 | 17 | |
| | *Cérès P 2* | 7 | 13 | |
| | *Desprez Polybeta* | 2 | 11 | |
| | *KWS Mégapoly* | 1 | 4 | |
| | *Blondeau BBC* | 4 | 4 | |
| | *Mennesson* | 5 | 5 | |
| | *Cérès P 3* | 8 | 3 | |
| | Monogerme génétique | 9 | 9 | |
| | Divers et inconnus | 6 | 11 | |
| Humidité du sol au semis | Sec | 1 | 69 | |
| | Humide | 2 | 6 | |
| Démariage | Présence | 1 | 44 | |
| | Absence | 0 | 31 | |

Il faut y ajouter 2 variables qui ont nécessité une élaboration particulière des données de l'enquête :

— *la succession des travaux de préparation des terres pour les semis.*

La diversité des outils utilisés et des méthodes de travail appliquées pour la préparation des terres rend l'analyse très complexe si on examine isolément chaque

intervention. Or la préparation de la terre est un tout, les outils étant utilisés en fonction du résultat des façons précédentes. Il a donc paru préférable d'étudier la succession des travaux sur la parcelle, une fois le labour effectué.

Il est apparu qu'ils sont généralement exécutés en 2 temps :

— *la reprise des labours* qui est exécutée soit à l'aide de herses, soit d'appareils à dents de type diviseur ;

— *la préparation des terres avant le semis* qui s'effectue dans un laps de temps très court précédant le semis. Les façons culturales sont réparties en fonction de la succession des types d'outil utilisés, ce qui permet de définir des façons profonde, semi-profonde, superficielle.

Finalement, la préparation des terres pour le semis peut se définir par les 6 modalités du tableau 6 :

TABLEAU 6

*Modalités de la préparation des terres pour le semis*

| Modalités de préparation des terres | Reprise du labour | | Façons préparatoires du semis | | | Effectifs |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Herse | Diviseur | Profondes | 1/2 profondes | Superficielles | |
| 1 | X | | X | X | X | 37 |
| 2 | X | | | X | X | 3 |
| 3 | X | | X | | X | 6 |
| 4 | | X | X | X | X | 9 |
| 5 | | X | | X | X | 8 |
| 6 | | X | | | X | 12 |

— *les périodes d'exécution des travaux.*

Les dates d'exécution, connues avec une précision variable, ont été regroupées en périodes dont la durée est en rapport avec la marge de manœuvre admise pour la bonne exécution des travaux. Les premières correspondent à la réalisation des labours et peuvent donc être de longue durée ; les suivantes correspondent aux travaux de printemps : la précocité et les conditions climatiques d'intervention peuvent avoir une influence, ce qui amène à définir des périodes assez courtes (tabl. 7).

Les dates limites ont été arbitrairement fixées dans un premier temps au 1er ou au 15 du mois, mais on a vérifié qu'elles n'interféraient pas avec des périodes de gelées ou de fortes pluies.

### 3. 2. — *Liaisons entre les variables*

L'examen des liaisons entre les variables se limite à un dépouillement sommaire dans le but :

— de réduire le nombre de variables à mettre en relation avec le rendement et ses composantes dans l'analyse globale. Il faut en effet rappeler ici que le nombre de coefficients à calculer est la somme du nombre de variables quantitatives et du nombre respectif de modalités de chaque variable qualitative ; dans ces conditions, la nécessité de réserver des degrés de liberté pour les tests statistiques fait que la taille de l'échantillon est la principale contrainte imposée au nombre de coefficients à calculer.

TABLEAU 7

*Répartition des travaux dans le temps*

| Travaux | Périodes | Dates limites | Nombre de cas |
|---|---|---|---|
| Labour | 1 | jusqu'au 31 décembre | 59 |
| | 2 | 1 au 31 janvier | 7 |
| | 3 | 1 au 28 février | 7 |
| | 4 | 1 au 15 mars | 1 |
| | 5 | 17 au 31 mars | 1 |
| Reprise du labour | 3 | 1 au 28 février | 4 |
| | 4 | 1 au 15 mars | 42 |
| | 5 | 16 au 31 mars | 12 |
| | 6 | 1 au 15 avril | 17 |
| Travaux préparatoires aux semis | 4 | 1 au 15 mars | 1 |
| | 5 | 16 au 31 mars | 26 |
| | 6 | 1 au 15 avril | 39 |
| | 7 | 16 au 30 avril | 7 |
| | 8 | 1 au 15 mai | 2 |

— de faire apparaître les liaisons possibles entre variables explicatives dont l'interprétation des résultats doit tenir compte.

On ne rapporte ici, à titre d'exemple, que quelques résultats de cet examen.

Les liaisons entre variables quantitatives sont présentées sur la figure 16, qui est un diagramme des coefficients de corrélation. On note que les liaisons entre le rendement et ses composantes n'apparaissent pas : elles sont examinées ultérieurement (voir chap. 4).

Les liaisons des variables qualitatives avec le rendement et les caractéristiques du végétal sont recherchées au moyen de comparaisons de moyennes.

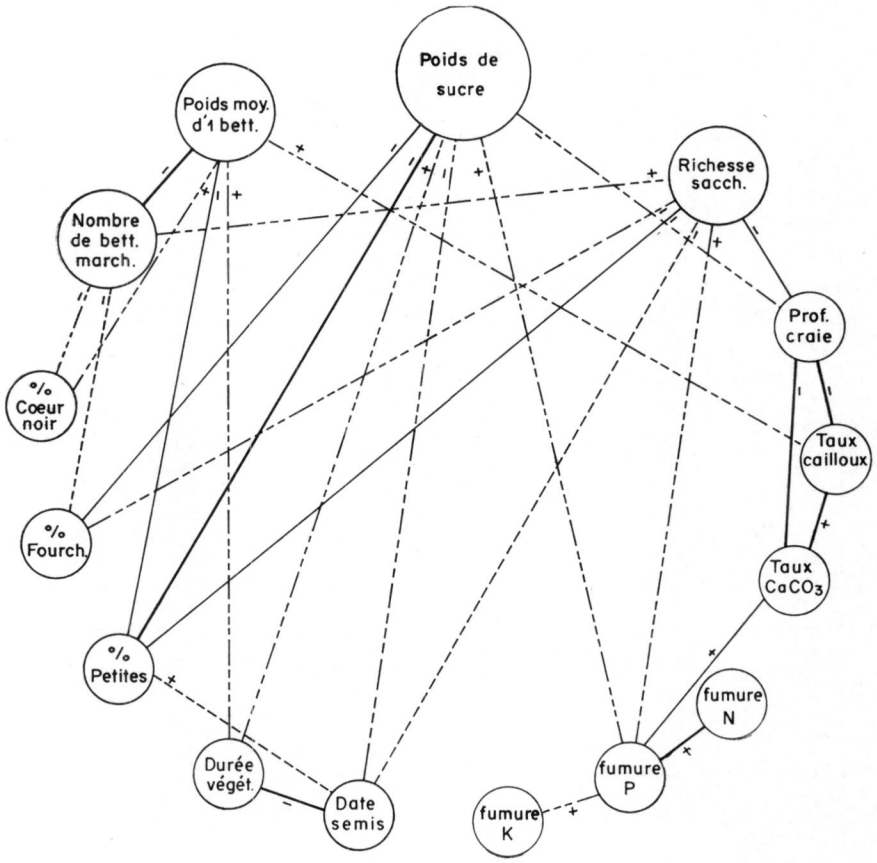
En particulier, les indices caractérisant la structure se sont révélés décevants, ce qu'on peut attribuer à la difficulté d'une notation globale d'un profil, à l'insuffisante homogénéité des observations des équipes de terrain, ou aux conditions climatiques de l'année. Cependant, certaines observations sur le voisinage des betteraves sont en relation avec leur morphologie (voir chap. 5).

On a en outre recherché les liaisons entre des variables techniques importantes : fertilisation d'une part, et précédent cultural, engrais vert et fumier d'autre part.

Les tables de contingence dressées pour les variables qualitatives, ont des effectifs souvent restreints : on se limite donc à une appréciation des liaisons possibles (fig. 17)

### 3. 3. — *Choix des variables*

Au terme de cette phase d'élaboration, les hypothèses qu'elle a permises se résument dans la liste des variables (agissant éventuellement en interaction) introduites dans le modèle mathématique global (tabl. 8).




| Seuil probabil. | r | Représentation |
|---|---|---|
| 0,10 | 0,13 | - - - - - - - - |
| 0,05 | 0,23 | — - - — - - |
| 0,01 | 0,30 | ———— |
| 0,001 | 0,38 | ———— |

FIG. 16. — *Diagramme des coefficients de corrélation*

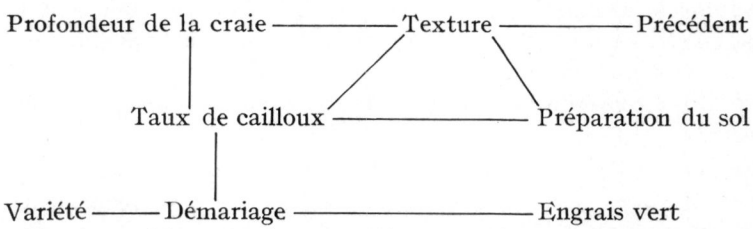



FIG. 17. — *Schéma des liaisons possibles entre variables qualitatives du sol et des techniques*

TABLEAU 8

*Variables explicatives introduites dans le modèle mathématique global*

| Variables | | Quantitatives | Qualitatives |
|---|---|---|---|
| Végétal | Composantes du rendement | Richesse saccharine<br>Poids moyen d'une betterave<br>Nombre betteraves marchandes | |
| | Variables intermédiaires | Taux de petites betteraves<br>Taux de betteraves fourchues | |
| Milieu | | Taux de cailloux<br>Taux de calcaire<br>Profondeur de la craie | Texture (5) * |
| Techniques | | Durée de végétation<br>Fumure azotée<br>Fumure phosphatée<br>Fumure potassique<br>Date de semis | Variété (9)<br>Précédent (4)<br>Engrais vert (2)<br>Fumier (2)<br>Époque de labour (5)<br>Préparation du sol (6)<br>Humidité du sol au semis (2)<br>Démariage (2) |
| Interactions | | Date de semis × préparation du sol<br>Profondeur de la craie × démariage<br>Fumure phosphatée × texture | |

* Le nombre de modalités est indiqué entre parenthèses.

## 4. — EXPLICATION DES RENDEMENTS

Pour étudier les relations entre le rendement R, c'est-à-dire le poids de sucre, et les diverses variables explicatives, il faut commencer par expliciter les hypothèses que l'on peut faire sur les liaisons entre ces variables.

Dans ce but, on a dessiné un graphe (fig. 18) où figurent 3 groupes de variables explicatives :

— composantes du rendement $x_i$ (variables quantitatives) en liaison fonctionnelle avec R puisque $R = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ ;

— variables intermédiaires $y_j$ (variables quantitatives) qui sont les taux de petites betteraves et les betteraves fourchues. Notons que l'ensemble des variables $x_i$ et $y_j$ caractérise le végétal ;

— variables quantitatives $z_l$ et qualitatives $t_k$, caractérisant le milieu et les techniques.

Ce graphe suggère les relations à calculer pour explorer la chaine des liaisons permettant de passer des variables « milieu-techniques » au rendement R. Si, par

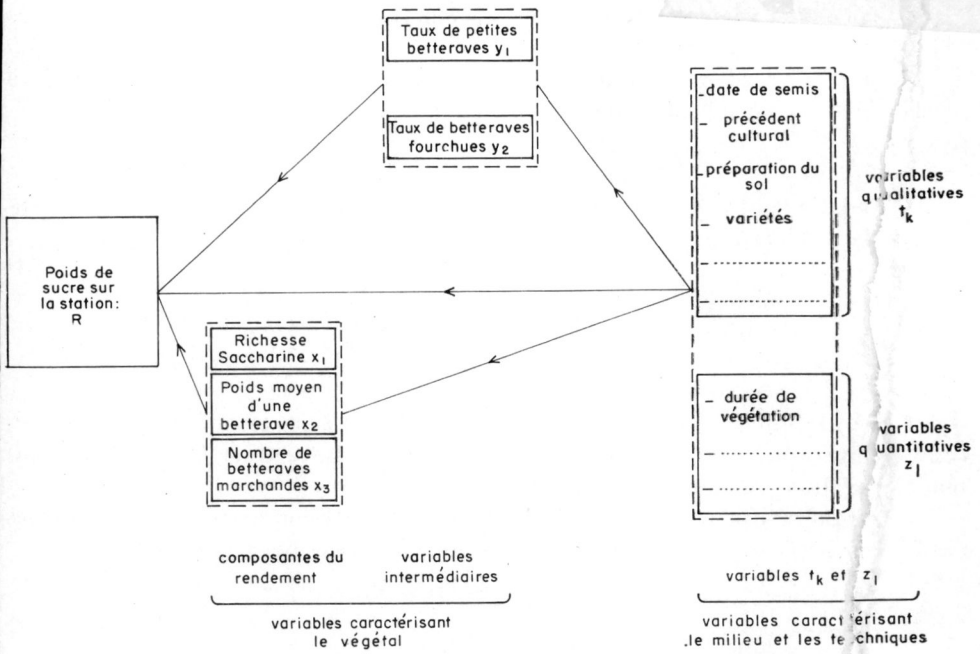



FIG. 18. — *Liaisons entre variables explicatives et variables à expliquer*

convention, on désigne par exemple par R $(x)$ la fonction reliant la variable à expliquer R aux variables explicatives $x_i$, on examine en premier lieu les équations :

$$\begin{matrix} R\ (x) \\ x_i\ (z, t) \\ y_j\ (z, t) \end{matrix}$$

exprimant les relations : rendement — composantes du rendement, et caractéristiques du végétal — variables « milieu-techniques ».

Mais c'est insuffisant pour plusieurs raisons :

— Le calcul des $x_i\ (z, t)$ pour $i = 1, 2, 3$ peut apporter une information biaisée sur l'explication du rendement, puisque les $x_i$ ne sont pas indépendants (cf. fig. 16). Ceci nous amène à calculer en plus R $(z, t)$, équation reliant directement le rendement aux variables « milieu-techniques ».

— Le graphe (fig. 18) suppose implicitement un dénombrement complet des variables $(z, t)$ et $y$. Or il ne l'est certainement pas. Ceci nous a amené à calculer les équations R $(z, t, y)$ et R $(y)$ pour les comparer à R $(z, t)$.

En définitive, on calcule les équations de régression :

R $(x)$ : rendement en fonction de ses composantes ;
R $(z, t)$ : rendement en fonction des variables du milieu et des techniques ;
$x_i\ (z, t)$ : composantes du rendement en fonction des variables du milieu et des techniques ;
R $(y)$ : rendement en fonction des variables intermédiaires ;

$y_i$ $(z, t)$ : variables intermédiaires en fonction des variables du milieu et des techniques ;

R $(z, t, y)$ : rendement en fonction des variables intermédiaires et des variables du milieu et des techniques.

4. 1. — *Explication du rendement par ses composantes*

La relation entre R et ses composantes est déterminée par la façon même d'apprécier le rendement :

$$R = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot 10^{-5} \qquad (4)$$

avec : R : poids de sucre (kg),

$x_1$ : richesse saccharine (p. 100 du poids),

$x_2$ : poids moyen d'une betterave (g),

$x_3$ : nombre de betteraves sur la station.

Pour préciser la part de variation de R que l'on peut attribuer à ses diverses composantes, on a testé, par l'analyse de variance, la relation (4) préalablement rendue additive par une transformation logarithmique.

Les résultats peuvent se résumer par la représentation graphique des sommes des carrés des écarts (SCE) affectées aux différents termes des régressions (fig. 19).

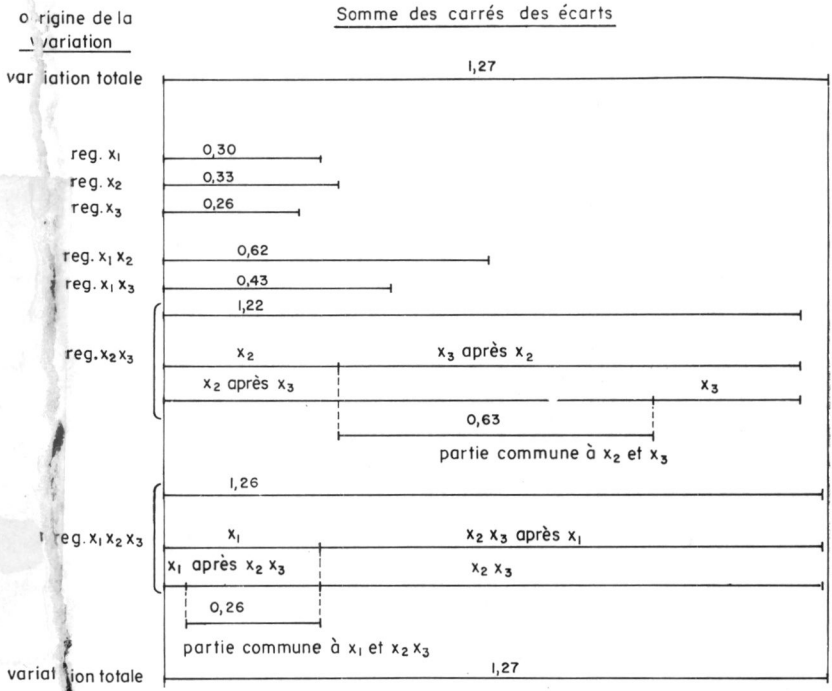



FIG. 19. — *Somme des carrés des écarts des régressions R(x)*

Il apparaît que les 3 composantes ont un effet significatif et que, prises ensemble elles expliquent la plus grande partie de la variation de log R :

$$\log R = 1{,}008 \log x_1 + 0{,}999 \log x_2 + 1{,}055 \log x_3 + 0{,}070$$

avec R en kg et $x_1$, $x_2$, $x_3$ en unités convenables pour que :

$$R = x_1 . x_2 . x_3 .$$

Parmi les régressions doubles, celle concernant $x_3$ et $x_2$ est de loin la plus « explicative ». La variable richesse saccharine $x_1$, introduite ensuite, est encore significative.

L'existence des liaisons, assez étroites entre $x_2$ et $x_3$, faibles entre $x_1$ et $x_2$, et $x_1$ et $x_3$ (fig. 19) explique ces résultats et justifie que par la suite on n'étudie que deux composantes du rendement la richesse saccharine ($x_1$) et le poids de betteraves ($x_2 \cdot x_3$).

L'effet d'une composante ne peut pas, en effet, être correctement analysé lorsqu'elle est très liée avec une autre.

4. 2. — *Explication du rendement par le milieu et les techniques*

Cette « explication » est recherchée au moyen du modèle mathématique global qui permet la prise en compte des variables qualitatives (cf. 2. 4.).

Les résultats comprennent :

— les coefficients de régression pour les variables quantitatives (entre parenthèses) ;

— les modifications du terme constant correspondant aux diverses modalités des variables qualitatives ; ces modalités sont regroupées lorsque leurs effets ne sont pas différents au seuil considéré ;

— le taux d'explication, c'est-à-dire la variance prise en compte par les variables explicatives, exprimée en p. 100 de la variance totale.

Ces résultats sont donnés pour le seuil immédiatement inférieur à 5 p. 100, communément utilisé. Le nombre de variables significatives diminue en même

TABLEAU 9

*Équation R (z, t) au seuil 4,8 p. 100*

| Variables | Modalités | Coefficients |
|---|---|---|
| Terme constant | | — 10,58 |
| Durée de végétation | | (+ *0,62*) |
| Variétés | 5 et 8<br>1 et 3<br>2, 4, 6, 7 et 9 | + 22,08<br>+ 4,09<br>— 10,47 |
| Précédent cultural | 1, 2 et 3<br>4 | + 14,11<br>— 42,33 |
| Engrais vert | Présence<br>Absence | + 8,08<br>— 8,08 |
| Préparation du sol | 4 et 5<br>1, 2, 3 et 6 | + 16,11<br>— 8,05 |
| Engrais phosphaté (interaction) | Si texture 2 ou 4<br>Si texture 1, 3 ou 5 | (+ *0,045*)<br>(— *0,030*) |
| Date de semis (interaction) | Si époque de labour 3 ou 5<br>Si époque de labour 1 ou 2<br>Si époque de labour 4 | (+ *0,81* )<br>(+ *0,13* )<br>(— *1,89* ) |

Taux d'explication : 46,5 %.

temps que le seuil. On peut avoir des indications intéressantes en examinant quelles variables supplémentaires seraient introduites éventuellement, si l'on se contentait du seuil immédiatement inférieur à 10 p. 100.

4. 21. *Rendement* : $R\ (z, t)$.

Le tableau 9 donne tous les éléments pour écrire l'équation R $(z, t)$ du poids de sucre.

Par exemple, pour les textures 2 et 4, et les époques de labour 3 ou 5 :

R = 0,62 (durée végétation) + 0,04 (fumure phosphatée) + 0,81 (date semis) + C.

En effet le coefficient de régression de la fumure phosphatée est fixé par la modalité de la texture (interaction texture × fumure phosphatée) ; il en est de même pour la date de semis en interaction avec l'époque de labour.

Pour une combinaison donnée des modalités des variables qualitatives, on obtient la constante C en ajoutant leurs coefficients respectifs au terme constant général (tabl. 10).

TABLEAU 10

*Exemple de calcul du terme constant C*

| Variables | Modalités | Coefficients |
|---|---|---|
| Variétés ..... | 1,3 | 4,09 |
| Engrais vert ..... | 1 | 8,08 |
| Préparation sol ..... | 4,5 | 16,11 |
| Précédent ..... | 4 | — 42,33 |
| Terme constant général. | | — 10,58 |
| | | Total : — 23,63 |

Dans ce cas, l'équation est :

R = 0,62 (durée végétation) + 0,04 (fumure phosphatée) + 0,81 (date semis) — 23,63.

4. 22. *Richesse saccharine : $x_1\ (z, t)$.*

Les résultats sont donnés par le tableau 11.

On note que c'est pour la richesse saccharine que le plus grand nombre de variables explicatives apparaissent lorsqu'on se borne à un seuil inférieur à 10 p. 100 (tabl. 12).

4. 23. *Poids de betteraves $x_2 \cdot x_3\ (z, t)$.*

Les résultats sont donnés par le tableau 13.

4. 24. *Rendement en fonction des variables intermédiaires : R $(y)$.*

Au seuil 0,4 p. 100, l'équation de régression obtenue s'écrit :

$$R = 123{,}9 - 0{,}232\ y_1 - 0{,}039\ y_2$$

$y_1$ : p. 100 de petites betteraves

$y_2$ : p. 100 de betteraves fourchues.

Le taux d'explication de ce modèle est de 36 p. 100 seulement.

TABLEAU II

*Équation $x_1$ (z, t) au seuil 1,8 p. 100*

| Variables | Modalités | Coefficients |
|---|---|---|
| Terme constant | | + 138,7 |
| Nombre de jours de végétation | | (+ *0,14*) |
| Variétés | 1, 2, 4, 5 et 8<br>3, 6 et 9<br>7 | + 3,10<br>— 1,77<br>— 10,21 |
| Démariage | Absence<br>Présence | + 2,53<br>— 2,53 |
| Précédent cultural | 1, 2 et 3<br>4 | + 5,38<br>— 16,13 |
| Fumier | Présence<br>Absence | + 3,01<br>— 3,01 |
| Préparation du sol | 3, 4 et 5<br>1, 2 et 6 | + 5,06<br>— 5,06 |
| Époque de labour | 3 et 5<br>1, 2 et 4 | + 6,96<br>— 4,64 |

Taux d'explication : 55,4 %

TABLEAU I2

*Variables de $x_1$ (z, t) apparaissant au seuil 8,2 p. 100, non significatives au seuil 1,8 p. 100*

| Variables | Modalités | Cœfficients |
|---|---|---|
| Fumure azotée | | (— *0,034*) |
| Fumure potassique | | (+ *0,030*) |
| Texture | 2<br>1 et 4<br>3 et 5 | + 42,78<br>— 2,45<br>— 18,94 |
| Humidité du sol au semis | 2<br>1 | + 2,64<br>+ 2,64 |
| Fumure phosphatée (interaction) | Si texture 3 et 5<br>1 et 4<br>2 | (+ *0,11* )<br>(+ *0,07*)<br>(— *0,23* ) |

TABLEAU 13

*Équation $x_2$ $x_3$ (z, t) au seuil 2,3 p. 100*

| Variables | Modalités | Coefficients |
|---|---|---|
| Terme constant | | — 49 420 |
| Nombre de jours de végétation | | (+ *622,90*) |
| Variétés | 3, 5 et 8<br>1, 2, 4, 6, 7 et 9 | + 7 687<br>— 3 844 |
| Précédent cultural | 1, 2 et 3<br>4 | + 5 747<br>— 17 240 |
| Engrais vert | Présence<br>Absence | + 4 874<br>— 4 874 |
| Préparation du sol | 4 et 5<br>1, 2, 3 et 6 | + 7 441<br>— 3 721 |
| Époque du labour | 2<br>1, 3, 4 et 5 | + 26 090<br>— 6 524 |
| Engrais phosphaté (interaction) | Si texture 2 ou 4<br>Si texture 1, 3 ou 5 | (+ *24,40*)<br>(— *16,26*) |
| Date de semis (interaction) | Si date de labour 1, 3 ou 5<br>Si date de labour 2 ou 4 | + 458,0<br>— 687,0 |
| Taux d'explication : 41,1 % | | |

Pour évaluer l'incidence d'une variable explicative sur les variations de rendement on peut multiplier l'écart-type de cette variable par son coefficient de régression et rapporter ce produit à l'écart-type de la variable expliquée. A titre indicatif, car les variables ne sont pas normales, on peut voir que :

— lorsque les betteraves fourchues s'accroissent d'un écart-type, le poids de sucre diminue de 6,4 soit 24 p. 100 de l'écart-type du poids de sucre.

— lorsque les petites betteraves s'accroissent d'un écart-type, le poids de sucre diminue de 14,1 soit 53 p. 100 de l'écart-type du poids de sucre ;

La présence de petites betteraves serait donc plus gênante que celle de betteraves fourchues.

4. 25. *Petites betteraves (p. 100 de betteraves marchandes) : $y_1$ (z, t).*

Les résultats sont donnés par le tableau 14.

4. 26. *Structure des liaisons.*

Si on compare les équations R (*z, t*), R (*z, t, y,*) et R (*y*), on constate que les taux d'explication sont de :

36 p. 100 pour R (*y*)
46 p. 100 pour R (*z, t,*)
et 53 p. 100 pour R (*z, t, y,*).

TABLEAU 14

*Équation $y_1$ (z, t) au seuil 2,2 p. 100*

| Variables | Modalités | Coefficients |
|---|---|---|
| Terme constant | | + 341,5 |
| Nombre de jours de végétation | | (— *1,78*) |
| Variétés | 2, 6 et 7<br>1, 3, 5 et 9<br>4 et 8 | + 32,14<br>— 0,50<br>— 47,20 |
| Précédent cultural | 4<br>1, 2 et 3 | + 53,32<br>— 17,77 |
| Texture | 4 et 5<br>1, 2 et 3 | + 126,40<br>— 84,29 |
| Humidité du sol au semis | 1<br>2 | + 36,94<br>— 36,94 |
| Préparation du sol | 1, 3, 4 et 6<br>2 et 5 | + 18,10<br>— 36,19 |
| Époque du labour | 1, 2, 4 et 5<br>3 | + 33,36<br>— 133,40 |
| Fumure phosphatée (interaction) | Si texture 1, 2 ou 3<br>Si texture 4 ou 5 | (+ *0,48*)<br>(— *0,72*) |
| Date de semis (interaction) | Si époque de labour 3 ou 4<br>Si époque de labour 1, 2 ou 5 | (+ *1,95*)<br>(— *1,30*) |

Taux d'explication : 39,4 %

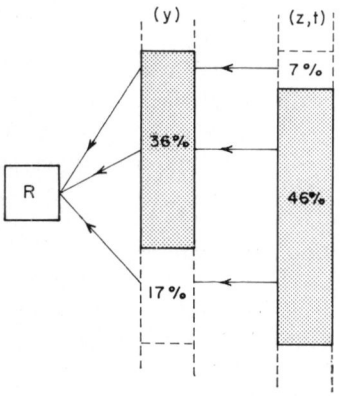



FIG. 20. — *Structure des liaisons*

La comparaison des taux d'explication (fig. 20) montre d'abord que nous n'avons pas enregistré toutes les variables « milieu-techniques » ($z$, $t$) ni toutes les variables intermédiaires ($y$). On peut penser qu'il manque davantage de variables ($y$) que de variables ($z$, $t$) du fait que le taux d'explication augmente lorsqu'on passe de R ($y$) à R ($z$, $t$) ; certaines variables « milieu-techniques » n'interviennent sans doute pas sur R par l'intermédiaire des $y$. Le gain enregistré lorsqu'on passe de R ($z$, $t$,) à R ($z$, $t$, $y$,) peut s'expliquer par le fait que des variables « milieu-techniques » inconnues interviennent sur R par l'intermédiaire des $y$.

Quand on passe de R ($z$, $t$,) à R ($z$, $t$, $y$), l'adjonction des ($y$) se traduit par la disparition de certaines variables ($z$, $t$,) et l'apparition d'autres :

— variable en moins : préparation du sol, date de semis en interaction avec l'époque de labour, fumure phosphatée en interaction avec la texture ;

— variable en plus : teneur en cailloux de l'horizon de surface (influence négative) profondeur d'horizon calcaire (influence négative), texture.

La disparition des variables peut s'interpréter par le fait que leurs effets sont traduits par les $y$ ; toutes ces variables interviennent en effet sur $y_1$ ou $y_2$.

Par contre, l'apparition de nouvelles variables ne peut guère s'expliquer que par des relations entre variables explicatives. On peut indiquer par exemple les liaisons possibles entre préparation du sol, texture et taux de cailloux (cf. fig. 17).

La comparaison des 3 expressions du rendement permet donc de préciser la structure des liaisons.

### 4. 3. — *Synthèse des résultats*

Le tableau 15 donne une vue d'ensemble des résultats. Chaque ligne de ce tableau est attribuée à une variable explicative ($z$, $t$,) et chaque colonne à une variable intermédiaire, à une composante du rendement ou au rendement (cf. ANON., 1970).

Le type d'influence d'une variable sur un résultat est codifié à l'intersection d'une ligne et d'une colonne par :

\+ si la modalité augmente le résultat, ou si un accroissement de la variable entraîne un accroissement du résultat,

— si la modalité diminue le résultat, ou si un accroissement de la variable entraîne une diminution du résultat,

o si la variable n'a pas d'influence significative.

Ces signes sont donc ceux du coefficient de l'ajustement.

On a indiqué à droite de la colonne poids de sucre, les regroupements de modalités indicés 1, 2, 3, tels qu'ils ressortent des équations. Le regroupement noté 1 est le plus favorable.

#### 4. 31. *Commentaires sur l'action des variables.*

Pour commenter les résultats, il faut indiquer les critères permettant de juger de leur *cohérence*. La liaison fonctionnelle entre le rendement R et ses composantes $x_1$ et $x_2$ $x_3$ permet en effet de contrôler la cohérence des résultats. Si, par suite d'un biais dans l'échantillon, certains résultats peuvent apparaître incohérents, nous ne les commenterons pas, de même que ceux correspondant à un effectif trop faible.

TABLEAU 15

*Synthèse des résultats*

| Variables | | Fourchues $y_2$ | Petites $y_1$ | Richesse saccharine $x_1$ | Poids total $x_2x_3$ | Poids de sucre R | Regroupements de modalités dans R ($z$, $t$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variétés | 1 | + | — | + | — | + | |
| | 2 | + | + | + | — | — | 2 |
| | 3 | + | — | — | + | + | |
| | 4 | + | — | + | — | — | 3 |
| | 5 | — | — | + | + | + | |
| | 6 | + | + | — | — | — | 1 |
| | 7 | + | + | — | — | — | |
| | 8 | — | — | + | + | + | |
| | 9 | + | — | — | — | — | |
| *Durée de végétation* | | — | — | + | + | + | |
| Texture | 1 | 0 | — | 0 | 0 | 0 | |
| | 2 (*) | 0 | — | 0 | 0 | 0 | |
| | 3 | 0 | — | 0 | 0 | 0 | |
| | 4 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | |
| | 5 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | |
| *Carbonates* (p. 1 000) | | + | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Précédent cultural | 1 | + | — | + | + | + | |
| | 2 | — | — | + | + | + | 1 |
| | 3 | + | — | + | + | + | |
| | 4 | + | + | — | — | — | |
| Fumier | absence | — | 0 | — | 0 | 0 | |
| | présence | + | 0 | + | 0 | 0 | |
| Engrais vert | absence | 0 | 0 | 0 | — | — | |
| | présence | 0 | 0 | 0 | + | + | |
| Époque de labour | 1 | + | + | — | — | 0 | |
| | 2 | + | + | — | + | 0 | |
| | 3 | + | — | + | — | 0 | |
| | 4 | + | + | — | — | 0 | |
| | 5 | — | + | + | — | 0 | |
| Préparation du sol | 1 | + | + | — | — | — | |
| | 2 | + | — | — | — | — | |
| | 3 | + | + | + | — | — | |
| | 4 | + | + | + | + | + | 2 |
| | 5 | — | — | + | + | + | 1 |
| | 6 | + | + | — | — | — | |
| *Date de semis* si époque de labour | 1 | — | — | 0 | + | + | 2 |
| | 2 | — | — | 0 | — | + | |
| | 3 | — | + | 0 | + | + | |
| | 4 (*) | + | + | 0 | — | — | 3 1 |
| | 5 (*) | + | — | 0 | + | + | |
| Humidité du sol au semis | 1 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | |
| | 2 | 0 | — | 0 | 0 | 0 | |
| Démariage | absence | — | 0 | + | 0 | 0 | |
| | présence | + | 0 | — | 0 | 0 | |
| *Fumure phosphatée* si texture | 1 | 0 | + | 0 | — | — | |
| | 2 (*) | 0 | + | 0 | + | + | |
| | 3 | 0 | + | 0 | — | — | 1 2 |
| | 4 | 0 | — | 0 | + | + | |
| | 5 | 0 | — | 0 | — | — | |

(*) *La modalité n'est représentée que par une observation.*

Pour qu'une variable intervienne de façon cohérente, elle doit agir *dans le même sens* sur le rendement et sur l'une *ou* l'autre, ou l'une *et* l'autre de ses composantes. Ceci correspond à une table de vérité (tabl. 16) qui se retrouve par la somme logique (1 : effet, 0 : pas d'effet). On peut aussi écrire cette table de vérité en utilisant les diverses combinaisons d'effets positif (signe +) et négatif (signe —).

TABLEAU 16

*Tables de vérité permettant de juger de la cohérence des résultats*

| $x_1$ | $x_2 \cdot x_3$ | R |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |

| $x_1$ | $x_2 \cdot x_3$ | R |
|---|---|---|
| + — | + — | + — |
| 0 | 0 | 0 |
| + — | 0 0 | + — |
| 0 0 | + — | + — |

Lorsqu'une variable a une action de *sens opposé* sur les 2 composantes du rendement, il n'y a plus de contrôle de cohérence possible ; mais le résultat n'est pas faux pour autant et suggère des hypothèses sur l'action des variables. Deux cas peuvent se présenter :

— les actions sur les composantes se compensent, l'effet sur le rendement est nul (actions opposées égales) ;

— l'action sur une composante est plus forte que sur l'autre ; le rendement est affecté dans le même sens que la composante la plus influencée (actions opposées non égales).

Toutefois, même avec ces hypothèses, il reste quelques résultats incohérents que nous indiquerons en 4. 32.

4. 32. *Effets des variables.*

*Variétés.*

— Les variétés de 5 à 9 ont une action cohérente, c'est-à-dire de même sens sur les composantes et sur le rendement :

- variété 5 (*Mennesson*) et 8 (*Cérès P 3*) : effet positif sur le poids de sucre par l'intermédiaire de l'augmentation de la richesse saccharine et du poids total, eux-mêmes favorisés par la diminution des betteraves petites et fourchues;
- variété 6 (divers et inconnues) et 7 (*Cérès P 2*) : effet négatif sur le rendement et ses composantes expliqué en partie par l'augmentation du taux des petites et des fourchues;
- variété 9 (monogerme génétique) : effet négatif sur le rendement et ses composantes, malgré une diminution du taux des petites.

— Les variétés 1 à 4 présentent le cas d'actions opposées non égales :

- variété 1 (*KWS Mégapoly*) : effet favorable résultant de l'accroissement de la richesse saccharine et de la diminution du nombre de petites ;
- variété 2 (*Desprez Polybeta*) : quoique favorisant la richesse, elle a un effet défavorable sur le rendement avec augmentation du taux des fourchues et des petites ;
- variété 3 (*Zwaanesse*) : effet favorable dû à l'augmentation du poids total par suite de la diminution du taux des petites.
- variété 4 (*Blondeau BBC*) : effet défavorable malgré une augmentation de la richesse saccharine et une diminution du taux des petites ;

Rappelons enfin que du point de vue du rendement, les variétés 5 et 8 sont les meilleures ; elles sont suivies par le groupe 1, 3, les autres étant regroupées dans la même classe.

*Durée de végétation.*

L'augmentation de la durée de végétation a un effet positif sur l'ensemble des résultats. Une variation d'un écart-type de la durée de végétation, soit 12 jours, se traduit par une variation de 7,5 hg du poids de sucre, soit 28 p. 100 de l'écart-type du rendement. Il est important de noter que la dispersion de la durée de végétation est faible.

Si on cherche le mécanisme de ces actions, on ne peut expliquer la diminution de pourcentage des fourchues que par le plus fort développement d'une des ramifications qui à la longue passe pour le pivot. La diminution du nombre des petites betteraves s'interprète de façon évidente. Les effets précédents vont dans le sens de l'augmentation du tonnage constatée.

L'amélioration de la richesse saccharine tient certainement à ce que l'augmentation de la teneur en sucre pendant l'automne ensoleillé de 1969 augmentait avec le temps écoulé à partir de la récolte la plus précoce.

*Texture de la couche travaillée.*

Il n'y a pas d'effet direct de la texture sur le rendement et ses composantes. L'influence sur le taux de petites n'a pas de répercussions. Cette variable n'a donc pas d'effet direct apparent, du moins *telle qu'elle a été appréhendée*. Ceci peut tenir au fait que certaines textures sont représentées par des effectifs très faibles (cf. tabl. 2), ou ne présentent pas de différences marquées (cf. tabl. 3).

On note cependant que la texture intervient en interaction avec la fumure phosphatée et la préparation du sol.

*Carbonates dans l'horizon travaillé.*

Cette variable n'a pas d'effet sur le rendement, ni sur ses composantes.

*Précédents culturaux.*

Les précédents culturaux 1 (blé), 2 (escourgeon) et 3 (orge) ont un effet positif par opposition au groupe 4 qui est un regroupement hétérogène : 2 ray-grass, 1 betterave, 1 carotte, 1 seigle. Leur action est toujours cohérente.

Les précédents 1, 2, 3 améliorent le rendement et toutes ses composantes ; pour le précédent 2, il y a diminution du taux de petites et de fourchues ; les précédents 1 et 3 diminuent le nombre de petites mais augmentent celui des fourchues.

Le précédent 4 a un effet négatif sur le rendement et toutes ses composantes ; il augmente le taux de fourchues et de petites ; l'explication de cet effet est malaisé et peut soulever nombre d'hypothèses : difficultés d'enfouissement de la matière organique du ray-grass, effet négatif du précédent betterave.

*Fumier :* l'effet positif sur la seule richesse saccharine, est, en définitive sans action sur le poids de sucre. En outre, il augmente le nombre de fourchues.

*Engrais vert :* la présence d'engrais vert intervient positivement sur le rendement par l'intermédiaire du poids total ; les taux de fourchues et de petites ne sont pas modifiés.

*Époque de labour :* L'époque de labour n'a pas d'influence directe sur le rendement, mais apparaît en interaction avec la date de semis. Pour les époques 2 et 3 (janvier-février) on peut faire l'hypothèse que les effets antagonistes sur les composantes se compensent. l'époque 1 (jusqu'au 31 décembre) ne satisfait pas au critère de cohérence ; l'effet défavorable sur les composantes ne se retrouve pas sur le rendement ; l'effet sur les petites et les fourchues est pourtant favorable.

Les époques 4 (1er et 15 mars) et 5 (16 au 31 mars) sont représentées par une seule observation.

*Préparation du sol.*

Toutes les modalités, sauf une, agissent de façon cohérente sur les composantes et le rendement ; pour la modalité 3, l'effet négatif sur le rendement montre que l'effet négatif sur le poids total domine l'effet positif sur la richesse saccharine.

Pour faciliter l'interprétation, on examine (tabl. 17) la définition des modalités classées selon leurs effets sur le rendement et ses composantes. L'interaction prépa-

TABLEAU 17

*Définition et effets des préparations du sol*

| Modalités | Définition | | | | | Effets | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reprise labour | | Préparation semis | | | % fourchues | % petites | $x_1$ | $x_2x_3$ | R |
| | Herse | Diviseur | Prof. | 1/2 prof. | Super. | | | | | |
| 4 | | * | * | * | * | (+) | (+) | + | + | + |
| 5 | | * | | * | * | — | — | + | + | + |
| 3 | * | | * | | * | + | + | + | — | — |
| 1 | * | | * | * | * | + | + | — | — | — |
| 2 | * | | | * | * | + | — | — | — | — |
| 6 | | * | | | * | + | + | — | — | — |

ration du sol × texture n'a pas pu être introduite dans le modèle global ; elle sera étudiée de façon approximative par comparaison des différences de moyennes

(fig. 21) à défaut d'une analyse de variance avec un nombre inégal de répétitions.

L'influence de la préparation du sol est sensiblement analogue pour l'ensemble des textures et pour les limons moyennement sableux ; les conclusions s'appliquent donc surtout à cette texture.

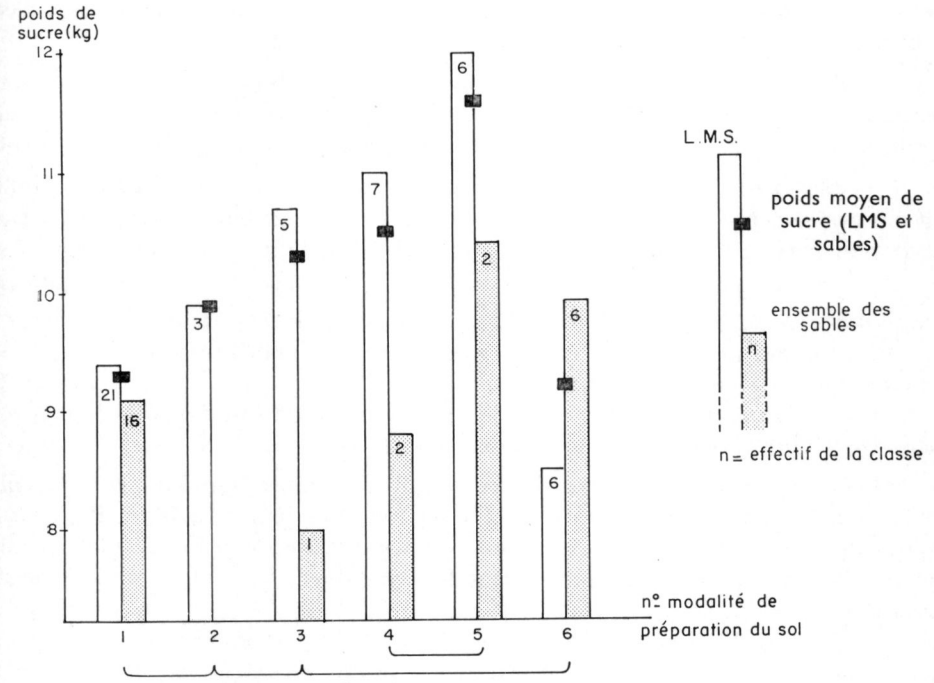



FIG. 21. — *Interaction texture × préparation du sol*

Les types de préparation défavorables comportent :

— soit une reprise de labour à la herse (modalité 1, 2, 3) qui pourrait avoir fait prématurément de la terre fine dans ces sols peu stables (effet direct). Il se pourrait aussi que la reprise à la herse, plus précoce que celle au diviseur (modalité 4 et 5) ait été faite dans des conditions moins favorables ;

— soit une préparation simplifiée (modalité 6), ce qui peut indiquer la nécessité, au moment du semis, d'une couche meuble suffisamment profonde, la couche labourée ayant pu se reprendre en masse.

En sols sableux, les effectifs, sauf pour les modalités 1 et 6, sont trop faibles pour proposer une interprétation d'ensemble.

Une interaction préparation du sol × texture est plausible ; elle se traduit par le fait que la préparation simplifiée 6, défavorable dans les limons, est favorable dans les sables, alors que les effets de la préparation 1 sont semblables dans les deux classes de sol.

On peut faire l'hypothèse que les sols sableux, du fait de leur susceptibilité au tassement sont sensibles à des façons culturales intenses ; une préparation simplifiée de type 6 diminue en plus le risque d'intervention en conditions défavorables.

*Date de semis :* la date de semis intervient en interaction avec la date de labour. On ne commente pas les modalités 4 et 5 (une seule observation). L'exécution

tardive des semis semble augmenter le poids de sucre en augmentant le tonnage.

Mais il faut noter que l'accroissement de la variable date de semis diminue la durée de végétation qui est en liaison positive avec le rendement. Ceci introduit l'hypothèse d'un effet spécifique de l'époque de semis. Dans cette hypothèse, on peut penser qu'il existe une date de semis optimum, mais on n'a pas ici les moyens d'en déterminer pratiquement la valeur.

*Humidité du sol au semis* : le semis en sol humide diminue le taux de petites betteraves, ce qui peut s'expliquer par une germination plus régulière à cause d'un meilleur contact terre-graine. Mais cet effet n'a pas de conséquence sur le rendement.

*Démariage :* le démariage apparaît sans effet sur le rendement, bien qu'il ait une action défavorable sur la richesse saccharine. Le pourcentage de petites betteraves n'est pas affecté, mais le fourchage est plus important s'il y a démariage.

*Fumure phosphatée :* cette fumure agit sur le poids de sucre par l'intermédiaire du poids total en intervenant sur le taux des petites betteraves.

Cette action varie avec la texture. Elle est positive pour les sables limoneux et négative pour les autres textures.

Dans aucun ajustement, les variables fumure azotée et fumure potassique n'apparaissent significatives à un seuil inférieur à 5 p. 100.

Il faut faire une mention spéciale pour le taux de cailloux dans l'horizon travaillé et la profondeur de la craie. Ces variables apparaissent, dans l'équation R ($z$, $t$, $y$), toutes deux avec un effet négatif. Ceci n'est compatible du point de vue logique qu'avec l'existence d'un optimum pour ces deux variables puisqu'elles sont liées négativement.

C'est vraisemblablement l'hétérogénéité du matériau qualifié de « craie » et les actions de sens opposés qu'elle peut avoir (effet positif sur réserve en eau et négatif sur la préparation du sol, par l'intermédiaire des éléments grossiers), qui a empêché une mise en évidence nette de cette action.

Au seuil immédiatement inférieur à 10 p. 100, des variables nouvelles apparaissent dans l'une au moins des équations, ce sont :

fumure azotée
fumure potassique
taux de cailloux
profondeur de la craie

Il importe de préciser que lorsqu'une variable n'intervient pas, cette conclusion n'est valable que dans la *gamme de variation observée* pour l'année 1969 et dans la région étudiée.

## 5. — CARACTÉRISTIQUES DU SOL ET FORMES DES BETTERAVES

La partie utile de la betterave étant une racine, sa forme et ses dimensions ont une importance particulière tant pour l'arrachage au moment de la récolte, pour le lavage en sucrerie (tare), que pour le rendement proprement dit (cf. liaison rendement-

pourcentage de betteraves fourchues). La recherche d'une influence du sol et de son état physique sur la forme des racines a donc un intérêt agronomique certain.

Mais indépendamment d'un intérêt de ce genre, cette étude est une contribution d'ordre général à la connaissance des réactions des racines aux conditions particulières du profil.

On a utilisé pour cette étude les dessins de profils culturaux, bien qu'ils n'aient pas toujours l'homogénéité souhaitable tant du point de vue des observations elles-mêmes (appréciation de compacité), que de leurs transcriptions sur les fiches.

L'interprétation des dessins comporte une part de subjectivité qu'on s'est efforcé de limiter, sans certainement la supprimer complètement.

Enfin, il peut y avoir un biais du fait qu'on considère dans le dépouillement chaque betterave individuellement, si bien que l'on accorde autant de poids à un phénomène s'il se manifeste sur plusieurs betteraves d'un même profil que s'il concerne un même nombre de betteraves observées sur des profils différents.

Les éléments suivants ont été notés :

*Pour la racine.*

— *formes particulières :* on a considéré seulement l'ensemble fourchage-émission dense des racines. En effet, quoiqu'on puisse distinguer après l'arrachage de la betterave le fourchage de l'émission dense, on a regroupé ces deux accidents tels qu'ils résultaient de l'examen du dessin. Ils se définissent ainsi : le fourchage est la subdivision du pivot en deux racines de diamètre supérieur à 1 cm ; l'émission dense est la subdivision du pivot en plus de deux racines de diamètre supérieur à 1 cm.

— *dimensions :* ce sont le diamètre de la betterave au collet et ce que nous appelons la profondeur de la betterave (profondeur maximum à laquelle se trouve une racine de diamètre supérieur à 1 cm). On a mesuré aussi la surface de la section verticale, c'est-à-dire celle délimitée par le dessin de la betterave. Cette mesure, réalisée par planimétrage, est un indice du poids de la betterave si l'on admet que ces surfaces sont proportionnelles au poids, ce qui peut ne pas toujours être exact pour les betteraves très mal conformées.

*Pour le sol.*

— *particularités du profil :* on a considéré les particularités du profil (limite entre deux zones de compacité différente notée : compacité, fond du labour, niveau de la craie, paille ou fumier, cailloux isolés, lissage ou compacité + paille lorsqu'il existe de la paille à une limite de zones compactes).

— *compacité de l'environnement :* elle est celle d'un cône de sol entourant la betterave de 5 à 10 cm de part et d'autre. Elle est appréciée par estimation visuelle de l'importance relative des zones meubles et des zones compactes.

— *profondeur de la craie :* lorsque dans le même profil, la profondeur de la craie variait, on l'a mesurée sous chaque betterave. Notons que dans certains cas c'est un horizon de transition qui a été appelé craie.

On ne considère les particularités du profil que lorsqu'elles sont susceptibles de gêner le développement de la racine ; on ne prend donc en compte que les particularités, qui d'après le dessin sont contiguës à la betterave.

### 5. 1. — *Formes particulières des betteraves*

Les histogrammes du nombre de betteraves déformées par profil (fig. 22) sont donnés pour deux groupes texturaux de sol (limons moyennement sableux et ensemble des sols sableux). Sans qu'on puisse en tirer des conclusions nettes, on note en sol sableux une plus grande proportion de profils pour lesquels la totalité des betteraves sont fourchues ou avec émission dense.

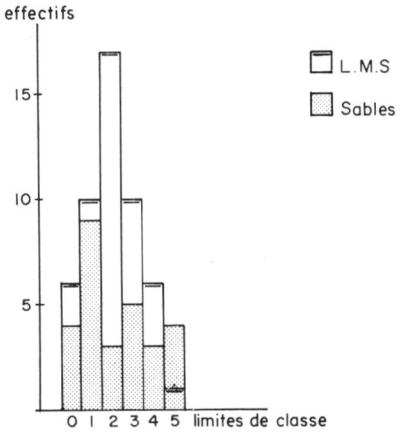



FIG. 22. — *Fourchage ou émission dense de betteraves* (5 par profil).

Pour déceler l'influence éventuelle des particularités du sol sur le fourchage et l'émission dense on a dressé une table de contingence (tabl. 18).

TABLEAU 18

*Relations entre les particularités du profil et celles de la betterave*

| | | Fourchage ou émission dense | |
|---|---|---|---|
| | | Absence | Présence |
| Particularités du profil | Absence | 102 (LMS) | 40 |
| | | 47 (S) | 22 |
| | Présence | 42 | 58 |
| | | 26 | 29 |

Les $\chi^2$ calculés montrent que les répartitions des betteraves suivant les deux classifications de la table ne peuvent être considérées comme indépendantes au seuil 0,01 pour les limons moyennement sableux et 0,05 pour les sols sableux. Une influence des particularités du profil sur les formes particulières des betteraves est donc plausible à la suite de cet examen. On retrouve donc bien la sensibilité de la betterave aux propriétés structurales.

Les faibles valeurs des effectifs nous ont empêchés de décomposer l'effet « particularités du profil » en effets de chacune des particularités (limite de compacité, lissage).

Cependant on peut faire quelques remarques :

Les accidents les plus fréquemment rencontrés sont les limites de compacité et la présence de paille ou de fumier. Du point de vue de l'effet de ces accidents, 70 p. 100 des cas de lissage correspondent à des fourchages, l'existence de limites de compacité aurait un effet négatif dans 60 p. 100 des cas environ ; la présence de paille ou de fumier irait de pair avec un fourchage dans la moitié des cas où ces particularités du sol existent. Le fond du labour paraît sans influence.

### 5. 2. — *Dimensions des racines*

#### 5. 21. *Diamètre au collet, profondeur de la betterave et texture.*

Il semble exister une corrélation positive entre ces deux caractères (fig. 23) : pour toutes les valeurs du diamètre au collet, les profondeurs atteintes sont supérieures dans les limons ; la betterave serait donc plus « ronde » dans les sables que dans les limons (tabl. 19).

TABLEAU 19

*Surface de la section selon la profondeur de la craie et la texture*

| | Limons moyennement sableux | Sols sableux |
|---|---|---|
| Diamètre moyen au collet (cm) ..... | 9,9 | 10,4 |
| Profondeur moyenne (cm) ..... | 18,7 | 17,5 |

#### 5. 22. *Surface de la section et texture.*

Il existe une corrélation positive entre la surface de la section et le diamètre au collet : $r = 0{,}87$ dans les sables. Pour les limons, on peut songer à un ajustement non linéaire, la droite de régression s'écartant sensiblement du nuage de points à ses deux extrémités. Les droites de régression étant distinctes pour les deux textures, on retrouve, tout au moins pour un diamètre au collet supérieur à 9 cm environ, la différence de forme établie précédemment ; les betteraves présentent, pour un même diamètre au collet, une surface de section supérieure dans les limons moyennement sableux (plus grande profondeur atteinte).

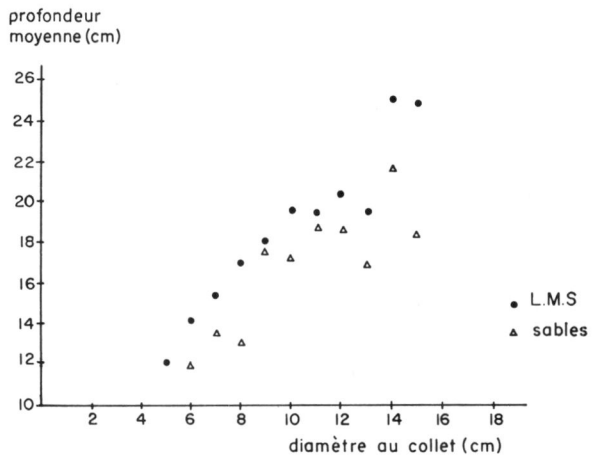



FIG. 23. — *Diamètre au collet et profondeur moyenne de la betterave « marchande » dans les sables et les L. M. S.*

5. 23. *Surface de la section, profondeur de la craie et texture.*

L'intervention de la profondeur de la craie, apparemment non linéaire, n'est bien marquée qu'en sols sableux (tabl. 20) *.

TABLEAU 20

*Surface de la section selon la profondeur de la craie et la texture*

| Profondeur de la craie | < 30 cm | 30-60 cm | > 60 cm |
|---|---|---|---|
| Limons moyennement sableux ($cm^2$).. | 162,9 | 150,3 | 150,3 |
| Sols sableux ($cm^2$) ..... | 197,1 | 147,6 | 160,2 |

TABLEAU 21

*Diamètre au collet et surface de la section selon l'environnement et la texture de la betterave*

| Environnement | Meuble | | Compact | |
|---|---|---|---|---|
| Texture | LMS | S | LMS | S |
| Effectif ..... | 111 | 54 | 33 | 20 |
| Diamètre au collet moyen (cm) ..... | 10,2 | 10,5 | 9,9 | 9,9 |
| Surface section moyenne ($cm^2$)..... | 157,2 | 156,0 | 144,0 | 144,0 |

* *Remarque* : la moyenne élevée relative au sable sur craie de profondeur inférieure à 30 cm a été mesurée sur un faible effectif.

5. 24. *Diamètre au collet, surface de la section et environnement de la betterave.*

Le végétal se comporte de manière équivalente (tabl 21) dans les sols sableux et les limons moyennement sableux. Mais la compacité de l'environnement ne semble pas avoir une influence très nette sur les deux caractères étudiés.

Les textures, qui dans cette étude ne sont pas très différentes, n'ont pas d'influence nette sur les dimensions des betteraves ni sur le mode d'intervention des particularités du profil, telles que lissage, limite de compacité, etc. Notamment le pourcentage de betteraves déformées est sensiblement le même pour les deux groupes de texture.

Il existe une liaison entre la déformation des betteraves et les particularités ponctuelles ou très localisées du profil cultural. Cette liaison explique en partie les difficultés de relier le rendement à des indices globaux du profil, l'hétérogénéité de ce dernier étant difficile à caractériser.

## CONCLUSIONS

### I. — *Conclusions méthodologiques*

Des conclusions méthodologiques s'imposent du fait que cette étude avait un but d'information et de formation.

*a*) Nous examinerons d'abord le *problème des risques* que l'on prend en effectuant une étude de synthèse.

Le fait que l'étude tend à être globale implique qu'on enregistre un nombre élevé de variables, quantitatives et qualitatives. Nous avons déjà vu que, pour des moyens donnés, l'enregistrement du maximum de données par point d'observation se fait au détriment du nombre de ces points. Ceci pose le problème de la dimension de l'échantillon et des inconvénients d'un échantillon trop faible. Nous allons donner un aperçu de ces inconvénients sur un exemple théorique : supposons qu'on ait enregistré sur un échantillon, 3 variables qualitatives $u$, $v$, $w$, qui présentent chacune deux modalités + et —. Pour étudier l'effet de $u$, on compare les moyennes correspondant aux modalités $u +$ et $u —$ ; pour un échantillon petit on court le risque qu'il y ait par exemple plus de combinaisons $v +$, $w +$ pour la modalité $u +$ que pour la modalité $u —$. On risque donc de ne pas pouvoir estimer l'effet de $u$ à cause de liaisons parasites entre $u$, $v$, $w$ et cela du seul fait du hasard. Il est difficile de déceler des « biais » de ce genre et d'en apprécier les conséquences pour les conclusions. La solution est d'augmenter le nombre d'observations comme deux d'entre nous (DEFFONTAINES et GRAS, *op. cit*) l'ont déjà recommandé, sans que l'on puisse fixer rigoureusement un effectif minimum.

Notons que la nécessité de disposer de degrés de liberté pour la variance résiduelle, permet de supputer un volume minimum de l'échantillon compte tenu du nombre des variables que l'on peut supposer intervenir. L'analyse statistique permet d'apprécier pour l'échantillon le risque que l'effet d'une variable ne soit pas dû au hasard. Cette conclusion ne peut être étendue à la population dont est issu l'échantillon que si celui-ci est représentatif de la population. On ne dispose pas, en général,

de tests permettant de juger de sa représentativité, et ceci nous ramène au risque examiné dans le paragraphe précédent.

Un autre risque provient de la façon d'appréhender les variables ; par exemple : il faudrait mesurer le poids de sucre au moment de la maturité physiologique de la betterave, mais comment apprécier celle-ci de façon précise ?... Vaut-il mieux exprimer le taux de cailloux en volume ou en poids ?... Les conclusions ne doivent pas être isolées du mode d'appréhension parce qu'elles risquent d'en dépendre en partie, et il est souvent imposé par des contingences matérielles.

Enfin, une fois les variables collectées, se pose le problème de l'analyse proprement dite. Il faut éventuellement transformer les variables quantitatives tant pour obtenir une distribution normale (particulièrement important pour les faibles effectifs) que pour ne pas conclure à une absence de liaison parce que curviligne, elle a été analysée comme étant linéaire. Lorsqu'une variable peut être exprimée de deux façons, laquelle choisir ? Par exemple faut-il caractériser un sol par sa place dans une classification de profils (variable qualitative) ou par les fractions granulométriques d'un de ses horizons (variable quantitative). Ceci nous amène au problème du modèle mathématique qui permet une analyse globale.

*b*) Nous avons voulu confirmer *l'intérêt d'un modèle mathématique* permettant de traiter les données quantitatives et qualitatives, dans la même équation, avec leurs interactions éventuelles. En effet, beaucoup de variables intervenant sur le rendement d'une plante cultivée sont qualitatives (précédent cultural, travail du sol, etc.).

On n'avait auparavant d'autres ressources que celles de traiter séparément ces variables ou de les rendre quantitatives à condition qu'il existe une relation d'ordre entre leurs divers états (cf. les indices de série géomorphologique de WACQUANT *in* DECOURT *et al.*, 1969). Cette dernière façon d'opérer implique l'hypothèse, risquée à notre avis, d'une action monotone du facteur qualitatif, les modalités étant classées dans un certain ordre ; on teste dans l'équation l'effet de son action dans une certaine hypothèse ; on conçoit qu'il est préférable d'examiner si ce facteur intervient, sans faire, dans un premier temps, d'hypothèse sur son mode d'action. Par exemple, nous aurions été bien en peine de ranger les précédents culturaux dans un ordre d'effet croissant vu la complexité de leur action.

Nous avons été amenés à garder sous une forme qualitative, des variables qui auraient pu s'exprimer facilement sous forme quantitative. C'est le cas des époques de labour qui sont définies par des intervalles de temps et non par une date. On teste alors l'effet « époque de labour » dans une hypothèse donnée de définition des « époques ».

Le modèle d'hypothèse linéaire généralisée présente l'avantage considérable de ne pas privilégier les variables quantitatives ou susceptibles d'être rendues quantitatives au prix d'une hypothèse sur leur mode d'action.

On peut objecter que ce modèle n'a pas les avantages de méthodes plus approfondies (n'utilisant d'ailleurs que les variables quantitatives ou « quantifiées »), telles que la régression orthogonale. S'il est souhaitable de faire apparaître l'action de composantes indépendantes et plus globales que les variables initiales (analyse factorielle), il arrive que ces méthodes reportent le problème au niveau de l'interprétation des composantes.

Nous faisons nôtre la conclusion de DECOURT *et al.* (*op. cit*) : « l'outil statistique fournit plus de suggestions que de preuves absolues ». Pour nous, il s'agit essentiellement de déceler l'existence de liaisons entre le rendement et les facteurs du milieu et techniques. Il faut ensuite vérifier que ces facteurs sont bien la cause première et ensuite proposer une explication. On touche là aux limites de l'étude globale. A partir d'un certain degré de finesse dans l'exploitation des données d'une enquête, on ne progresse plus guère parce qu'on a épuisé l'information disponible. Il devient alors nécessaire soit d'augmenter la quantité d'information dont on dispose, ce qui peut être fait par une autre enquête, soit de modifier la nature de cette information, ce qui peut expliquer un changement de méthode : passage à l'expérimentation par exemple.

*c*) L'étude globale fournit en général un *ensemble d'hypothèses* qui ouvrent la voie à des observations précises sur des points bien définis et à des expérimentations. Celles-ci impliquent une attitude beaucoup plus conforme à nos habitudes d'esprit : mettre en jeu un facteur ou un nombre limité de facteurs en essayant de contrôler les autres.

Beaucoup de difficultés d'études des effets du milieu et des techniques sur la plante tiennent à la nature même du problème et non aux méthodes. C'est une gageure que de vouloir étudier l'écologie des plantes cultivées avec une seule méthode. L'étude globale permet la mise en place d'une esquisse des effets principaux, qui facilite l'installation d'essais et oriente les directions d'une recherche plus approfondie. Ce faisant, l'étude globale est un élément de la préparation d'un programme de recherche en écologie.

## II. — *Conclusions agronomiques*

Les conclusions agronomiques de cette étude exploratoire sont à considérer avec une certaine prudence, compte tenu de l'exiguïté de l'échantillon. Rappelons qu'elles sont valables pour une région géographique définie, l'année de l'étude, avec les gammes de variations des techniques pratiquées. On ne peut pas affirmer la portée générale de ces conclusions.

Le taux d'explication des variations de rendement est, pour cette étude, au maximum de 53 p. 100, c'est-à-dire que la moitié de la variation reste inexpliquée. Indiquons à titre de comparaison que DECOURT *et al.* (*op. cit*) ont expliqué 70 p. 100 de l'indice de fertilité du Pin sylvestre en Sologne. En Ardèche, DEFFONTAINES et GRAS (1968) ont expliqué 18 p. 100 du rendement en pêches lorsque les arbres n'étaient pas irrigués et 66 p. 100 lorsqu'ils étaient irrigués; pour le rendement en cerises, le taux d'explication était de 40 p. 100.

Les principaux résultats concernent :

*Le végétal.* — Les variétés provoquent des variations de rendement et leur mode d'intervention sur les composantes du rendement est très divers.

L'augmentation de la durée de végétation est un facteur très favorable au rendement et à toutes ses composantes.

Le faible taux de petites betteraves et, à un moindre degré, de betteraves fourchues est un facteur favorable.

*Le sol.* — La texture de l'horizon travaillé intervient de façon indirecte en interaction avec la préparation du sol et la fumure phosphatée.

L'étude de la morphologie des betteraves montre l'influence des façons culturales superficielles sur le fourchage, par l'intermédiaire notamment des accidents structuraux.

*La rotation et les techniques culturales.* — Les précédents classiques (céréales) sont plus favorables que les autres. L'engrais vert a un effet positif sur le rendement par l'intermédiaire du tonnage.

Les travaux de printemps ont une influence marquée sur le rendement, ce qui permet de formuler des hypothèses sur l'action des différents outils de reprise du labour et de préparation du semis.

L'époque de semis a un effet sur le rendement en interaction avec l'époque de labour, le semis tardif étant défavorable.

*La fertilisation.* — Seul l'effet de la fumure phosphatée apparaît dans certains types de sol.

Remarquons l'importance des variables qualitatives sur l'explication du rendement, ce qui montre l'intérêt des méthodes de régression et d'analyse de variance généralisée à la prise en compte de variables qualitatives.

Si l'on définit les *facteurs* comme ce qui contribue directement à l'élaboration de la matière végétale (énergie reçue, éléments nutritifs) et les *conditions* comme les propriétés du milieu et de la plante permettant l'utilisation des facteurs, on remarquera que toutes les variables que nous avons appréhendées sont des conditions ; nous n'avons pas en effet introduit les caractères de richesse chimique du sol qui pouvaient certainement expliquer une partie des variations. Il est néanmoins important de signaler que la moitié de la variation du rendement s'explique par des conditions.

Une telle étude présente donc l'intérêt de fournir des indications sur l'influence des conditions sur la culture de la betterave, permet de formuler des hypothèses sur leurs modes d'actions et d'orienter un programme de travail.

*Reçu pour publication en avril 1971*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M. HEBERT, Directeur de la Station Agronomique de Laon, qui nous a aidés et accueillis pendant la durée de notre séjour, ainsi que le Service de cartographie du département de l'Aisne.

Nos remerciements vont également à l'Institut Technique de la Betterave qui a permis l'analyse mathématique des informations, réalisée par la S. E. M. A.

Enfin cette étude a été rendue possible grâce à la compréhension des exploitants qui ont été visités et à l'aide efficace des sucreries d'Aulnois, de Guignicourt, de Marles et de Montcornet.

## SUMMARY

### A CONTRIBUTION TO THE STUDY OF SUGAR BEET CULTIVATION IN THE LIGHT SOILS OF THE LAON AND CHAMPAGNE REGIONS OF THE AISNE DEPARTMENT

A study of sugar beet yields on light chalky soils of the Aisne Department has been carried out by the « Analysis and Synthesis » group. The purpose was to determine the causes of marked fluctuations in yield.

The authors proceeded by a systematic analysis and investigation of the prevailing factors and conditions affecting sugar beet cultivation in the farms of the area.

The possibilities and limitations of the study are discussed, bearing mainly on the character of the report as a synthesis taking into account several variables likely to affect production. Particular attention is drawn to the simultaneous consideration of qualitative and quantitative variables, resulting from the regression calculation method employed.

## ZUSAMMENFASSUNG

### BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER AUF LEICHTEN BÖDEN IN DEN GEBIETEN DES LAONNOIS UND DER CHAMPAGNE AN DER AISNE ANGEBAUTEN ZUCKERRÜBE

Das Verhalten der Zuckerrübe in den leichten Böden über Kreide des Aisne-Department wurde durch die Gruppe « Analyse et Synthèse » untersucht. Das angestrebte Ziel besteht in der Feststellung der Ursachen der bedeutenden Unregelmässigkeiten in den Erträgen.

Das ins Auge gefasste Verfahren besteht in einer systematischen Analyse mittels einer Untersuchungsmethode den Faktoren und der Anbaubedingungen der Zuckerrübe, wie dieselben im Rahmen der landwirthschaftlichen Betriebe durchgeführt werden.

Die Möglichkeiten und die Grenzen dieses Verfahrens werden diskutiert. Dieselben sind hauptächlich auf ihrem synthetischen Charakter gegründet in dem Sinne, dass es eine Gesamtheit von Veränderlichen in Betracht zieht, die in der Lage sind die Ertragshöhen zu beeinflussen. Dadurch wird das Interesse gezeigt, die qualitativen und quantitativen Veränderlichen leichzeitig zu berücksichtigen, was mit der verwendeten Regressionsberechnung möglich ist.

## РЕЗЮМЕ

### Сахарная свекла на легких почвах департамента Эн.

Р. ГРА, П. Л. ОСТИ, Ж. П. ДЕФОНТЭН, А. МАРЕН-ЛА ФЛЕШ.

Группа « Анализ и Синтез » провела изучение поведения сахарной свеклы в легких почвах залегающих на мелах в департаменте Эн. Преследовавшаяся цель — определение причин крупных количественных колебаний полученных урожаев.

Это изучение представляет систематический анализ с помощью метода анкет, факторов и условий влияющих на культуру сахарной свеклы таковой, каковой эта культура проводится в кадре местных хозяйств.

Рассматриваются возможность указанного подхода к данному вопросу и границы этого подхода вытекающие из его синтетического характера ибо подход этот принимает во внимание общность переменных величин способных оказать влияние на уровень продукции и особенно выявляет интерес одновременного рассмотрения всей совокупности количественных и качесвенных переменных. Это достигается благодаря применению рассчета регрессии.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANONYME. Le programme d'analyse statistique ESOPE (Estimation Statistique Optimale par Élimination). *Société d'Économie et de Mathématique Appliquée* (S. E. M. A).

ANONYME, 1970. Analyse statistique des rendements de cultures betteravières, I. N. R. A., I. T. B., S. E. M. A.

BOUDON R., 1967. *L'analyse mathématique des faits sociaux.* Plon, Paris, p. 145, 421, 422.

DECOURT N., GODRON M., ROMANE F., TOMASSONE R., 1969. Comparaison de diverses méthodes d'interprétation statistique de liaisons entre le milieu et la production du Pin sylvestre en Sologne. *Ann. Sci. forest.*, **26** (4) 420-421.

DEFFONTAINES J.-P., GRAS R., 1968. Les facteurs techniques de la production de la pêche tardive en Moyen Vivarais. *Ann. agron.*, **19** (1), 5-51.

JAMAGNE M., 1964. Introduction à une étude pédologique dans la partie Nord du Bassin parisien. *Pédologie*, **14** (2), 289-296.

MAUCORPS J. (Communications de l'auteur).

SUITS D., 1957. Use of dummy variable in regression equations. *J. Amer. Statist. Assoc.*, **52**, 548-551

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12** (1) 13-49.

# ANNEXE

## Reproduction de fiches d'enregistrement

*Station agronomique de Laon-I. N. R. A.*
Étude Sol (Betterave, 1969)

N° du ou des prélèvements
(ne pas remplir)

### Renseignements techniques sur la parcelle plus particulièrement sur la zone d'étude, si possible

(barrer les réponses inutiles et remplir les tableaux)

Exploitant : NOM..... Prénom : ..... .

Commune : .....

Dénomination de la parcelle : *Le Moulin-Brûlé* (2)

Culture ayant précédé les betteraves : *Blé*

Culture de la betterave 1969

Travaux du sol effectués depuis la récolte du précédent. Énumérer dans l'ordre, à partir du déchaumage inclus tout passage d'outils et matériel (appareils d'épandage, de traitement) sur la parcelle.

| Travail | Outil | Date approximative | État du sol au moment du travail (sec, humide, très humide) Conditions de réalisations (bonne, moyenne, mauvaise) |
|---|---|---|---|
| *Labour* ..... | *Charrue 2 socs* | *7 mars* | *Sol humide* |
| *Roulage* ..... | *Roule tôle* | *3 avril* | *État du sol : satisfaisant* |
| *Épandage* .... | *Engrais* | — | — |
| *Travail* ..... | *Kongskilde* | — | — |
| *Hersage* ..... | — | | — |
| *Traitement* ... | *Pyramide* | *4 avril* | — |
| *Roulage* ..... | — | — | — |
| *Herbage* ..... | — | — | — |
| *Semis* ..... | — | *7 avril* | — |

Pour cette culture de betterave :

Paille : enlevée, brûlée, enfouie (broyée, non broyée)

Engrais vert : Oui — Non — Lequel ? ..... Réussite ? Oui-Non

Amendement calcaire : Oui — Non — Lequel ? ..... Quantité ?

Fumier : Oui — Non ..... Quantité ? *30* t/ha

Gadoue : Oui — Non ..... Quantité ?

*Fiche « technique ». Recto.*

| Fumure minérale | Quantités épandues (unités/ha) | Formes | Dates |
|---|---|---|---|
| P | *Complet 400 kg*<br>*+ Scories potassiques 1 000 kg, 188 U* | *17.17.17*<br>*12/18* | *3-4-69*<br>*9-9-68* |
| K | *Complet*<br>*+ Scories potassiques, 148 U* | *17.17.17*<br>*12/18* | |
| N | *Complet*<br>*+ Sulfate ammoniaque 300 kg*<br>*Ammonitrate, 210 U* | <br><br>*33,5* | |
| Bore<br>Magnésie | *20 kg*<br>— | | |

Semis : Semoir (marque) *Tank*

Espacement entre lignes = .....*45* .....cm
Espacement entre graines sur la ligne = .....*17* .....cm

| Variétés : type diploïde ordinaire | Oui - Non | Naturelle | Oui - Non |
|---|---|---|---|
| *CÉRÈS* Polyploïde | Oui - Non | Segmentée | Oui - Non |
| Mono génétique | Oui - Non | Calibrée | Oui - Non |
| | | Enrobée | Oui - Non |

Démariage : Date : Nombre de feuilles
Nombre de pieds sur 10 m linéaire recherché :
Méthode : manuelle, mécanique.

Traitement : Désinfection des semences : Non - Oui
— du sol : Non - Oui
Si oui = généralisée - localisé
Heptachlore - Aldrine - Lindane

Désherbage chimique :

Non - Oui (localisé - généralisé) *1er : généralisé 3,500*
Préémergence - Post émergence *2e : localisé post-émergence*
produit utilisé : *Pyramine* *1,500 kg*
efficacité : bonne, moyenne, mauvaise *en postémergence*

Irrigation : Oui - Non

Remarques éventuelles sur la culture en cours :

sur les précédentes cultures de betterave de cette parcelle :
sur les précédentes cultures de betteraves de cette parcelle :
(comportement en année sèche et année humide).

*Récolte de betteraves en 1964 : 37 tonnes.*

*Fiche « technique ». Verso.*

*Station Agronomique de LAON.* - I. N. R. A.
Étude sol (Betterave, 1969)

N° du prélèvement
*55*

FICHE TERRAIN

Enquêteur : *GRAS - MARIN - LAFLÈCHE* Date : *19-9-69*

Nom de l'exploitant : Prénom :..... Commune : .....

N° carte topographique : *ASFELD 1.2* Nom de parcelle : *Le Chemin des Vins*

Sol carte : *LMS/craie 15-50* Sol enquête : *LMS/C. 30*

Propreté de la zone de prélèvement et de ses environs

— propre, assez propre, sale
— si sale, plantes dominantes

Maturité : Oui - Non

Coloration feuillage : normal - jaune

Maladies : cercosporiose *1*, Phoma *0*, Mildiou *0*,
(0,1,2) jaunisse *0*, Cœur noir.

(Délimiter un carré de 4 × 3,6 - planter 2 piquets).

Nombre total de betteraves (P) = *28*
Nombre de betteraves montées à graine = *0*
Échantillonnage 1/4 - 1/2 - 1/1
Nombre de betteraves prélevées (N) = *24*
Nombre de betteraves fourchues (F) = *16*
Nombre de betteraves atteintes de cœur noir (C) = *4*

Nombre de betteraves non marchandes (*n*) = *4*
— — dont normales = *2*
— — — fourchues = *2*

(Immatriculer échantillon sucrerie, date)
(Au milieu de la station, creuser un profil perpendiculairement aux lignes de betteraves.)

Racines

Interprétation sommaire (si possible), remarques, analyses souhaitées (pourquoi ?).

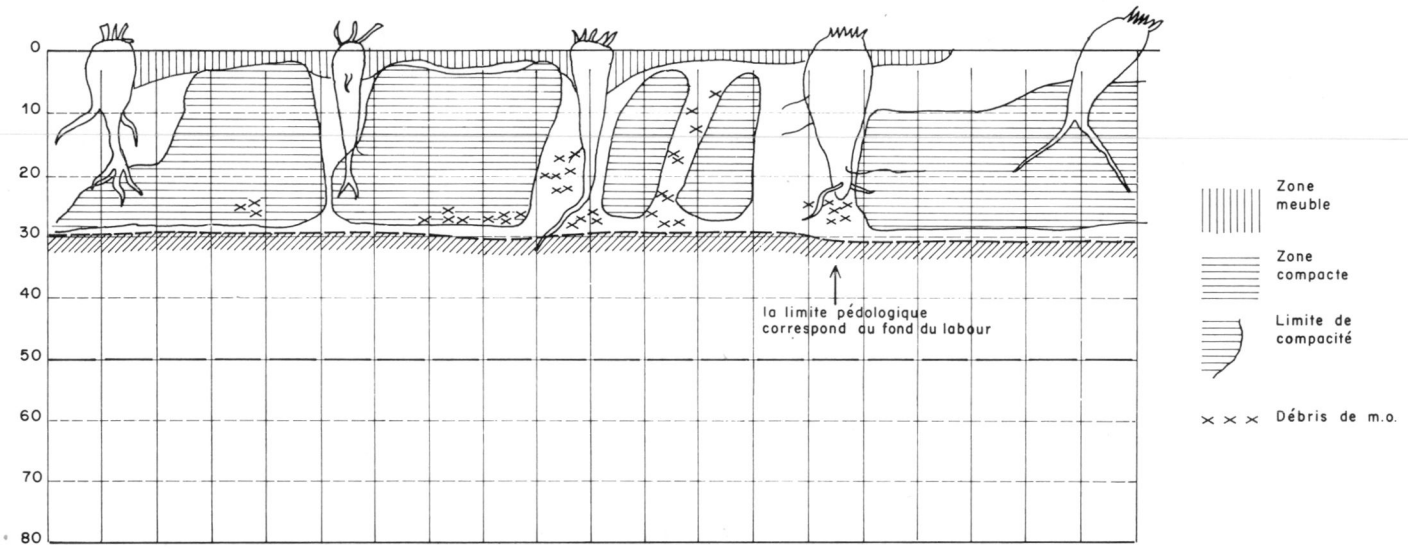
*En surface, 60-70 p. 100 d'éléments grossiers < 3 cm*

---

*Fiche «terrain». Recto.*

*Fiche «terrain». Verso.*

Dessin du profil : (limites horizons, cailloux surface, paille, anomalies, 6 betteraves)




Description du profil :

| Eléments grossiers | Terre fine | | | | Matière organique et faune | Hydromorphie | $CO^3Ca$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Couleur | Humidité | Texture | Structure | | | |
| 20 % < 1 cm | gris brun | frais (frais à humide autour des betteraves) sec | LMS | surface grumeleuse (3-4 mm) fragmentaire à continue polyèdrique sub-angulaire (2-4 cm) Très compact sauf au niveau des bouchons de paille | Qq. vers de terre M.o. assez abondante localisée, non noircie | o | + + + + + + |
| 28 à 31 — 80 % 1-5 cm | blanc | Sec à frais | limon calcaire et éléments calcaires | | | o | + + + |

*Ann. agron.*, 1971, **22** (5), 585-610.

# ÉVOLUTION DES PROPRIÉTÉS D'UN SOL SABLEUX SOUS L'INFLUENCE D'APPORTS MASSIFS ET RÉPÉTÉS DE MATIÈRES ORGANIQUES DE DIFFÉRENTES ORIGINES

J. DELAS

avec la collaboration technique de C. MOLOT et J. GIRAUDON

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,*
*33 - Pont de la Maye*

## RÉSUMÉ

Nous avons étudié, dans les conditions naturelles mais en l'absence de toute culture, l'évolution des propriétés d'un sol sableux qui a reçu chaque année, pendant 7 ans, de fortes quantités d'amendements organiques : paille de blé enfouie ou épandue en surface, tiges de maïs, foin de luzerne, marcs de raisins, fumier de champignons, fumier de ferme.

Ces apports ont accru la teneur en carbone du sol ; exception faite du foin de luzerne, l'enrichissement a été d'autant plus important que le rapport C/N des amendements était plus faible ; l'accroissement du taux de matière organique a été accompagné de modifications qualitatives des composés humiques. Au cours de la décomposition des pailles de blé et des tiges de maïs, il semble y avoir eu fixation d'azote atmosphérique.

La capacité d'échange de cations et l'activité biologique des sols à la fin de l'essai paraissent dépendre essentiellement de leur teneur en azote ou en carbone totaux ; la capacité de rétention pour l'eau, le pH, la richesse en éléments fertilisants ont également été modifiés par les apports d'amendements. La teneur du sol en azote minéral a peu varié avec les traitements probablement en raison de la nature filtrante du sol de l'essai.

## INTRODUCTION

De nombreux travaux ont été consacrés à l'influence de la matière organique sur les propriétés des sols ; une méthode couramment employée dans ces recherches consiste à enrichir le sol avec des matières organiques puis à mettre en évidence les conséquences de l'enrichissement sur telle ou telle propriété. Mais les données climatiques et pédologiques jouent dans ces phénomènes un rôle tel qu'il est difficile d'extrapoler sans précaution les résultats obtenus dans une situation donnée ; ceci explique dans une large mesure la multiplication de semblables études.

Certains sols viticoles du Bordelais semblent pouvoir se prêter particulièrement bien à des recherches concernant les conséquences d'un enrichissement en matière organique : il s'agit des sols sableux qui sont très pauvres, non seulement en composés humiques, mais aussi en colloïdes minéraux. Le faible niveau organique de ces sols a plusieurs causes : ils ne portent pas de végétation en dehors de la vigne ; les apports d'amendements humiques y sont rares depuis quelques décennies ; ces sols, en outre, sont soumis à l'action d'un climat doux et humide et font l'objet de nombreuses façons culturales — toutes choses favorisant la disparition de la matière organique. Dans ces conditions de pauvreté extrême, il était du plus grand intérêt de mesurer l'action des composés humiques sur les propriétés des sols viticoles sableux du Bordelais et de comparer les différents types d'amendements organiques susceptibles d'être utilisés.

C'est ce que nous avons voulu faire dans un essai dont nous rapportons les résultats dans ce mémoire.

## DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'essai a duré sept ans (décembre 1960 à décembre 1967) ; il a été implanté au domaine de la Grande-Ferrade dans une parcelle en très faible pente précédemment cultivée en vigne ; le sol qui appartient à la terrasse moyenne de la Garonne (étage *a1b*) est du type brun légèrement lessivé ; c'est un « sol de graves » qui contient un fort pourcentage de graviers et cailloux (33 à 47 p. 100) ; la texture de la terre fine est sableuse jusqu'à plus d'un mètre comme l'indiquent les résultats d'une analyse effectuée avant la mise en place de l'essai (tabl. 1).

TABLEAU I

*Analyse physique du sol de l'essai*

| | 0-40 cm | 40-80 cm | 80-120 cm |
|---|---|---|---|
| *P. 100 du total* | | | |
| Cailloux | 9,1 | 14,1 | 15,5 |
| Graviers | 23,9 | 22,4 | 31,5 |
| Terre fine | 67,2 | 63,5 | 53,0 |
| *P. 100 de terre fine* | | | |
| Argile, inférieure à 2 µ | 5,9 | 6,5 | 8,1 |
| Limon fin, 2-20 µ | 5,0 | 7,4 | 5,9 |
| Limon grossier, 20-50 µ | 6,1 | 4,7 | 5,6 |
| Sable fin, 50-200 µ | 10,0 | 12,2 | 14,1 |
| Sable grossier, 200-2 000 µ | 69,9 | 65,7 | 63,0 |
| Matières organiques | 0,8 | 0,6 | — |

Les caractéristiques chimiques initiales moyennes des 20 premiers centimètres de sol sont indiquées au tableau 2.

Ce sol est extrêmement pauvre en matière organique ; la valeur élevée du pH est la conséquence d'apports importants de scories, effectués quelques années avant la mise en place de l'essai.

La nécessité, pour une telle étude, d'opérer dans le milieu naturel entraîne des risques d'erreurs expérimentales beaucoup plus grands qu'en milieu contrôlé ou en cases lysimétriques ; chaque traitement doit donc être répété un grand nombre de fois et la surface des parcelles limitée pour accroître l'homogénéité de l'essai. Le dispositif expérimental comporte six blocs de huit parcelles

de 9 m² chacune. Les blocs sont limités par des allées de 1 m de large et les parcelles par des allées de 0,50 m. Les traitements correspondent à des apports annuels de divers types de matières organiques d'origine locale ; les doses appliquées chaque année pendant sept ans ont été exagérées dans le but de rendre appréciables en un temps assez court les variations des propriétés des sols.

TABLEAU 2

*Caractéristiques initiales moyennes du sol de l'essai* (0-20 cm)

(Moyenne des 48 prélèvements)

| | |
|---|---|
| N total (‰) | 0,43 |
| C total (‰) | 5,06 |
| C/N | 11,76 |
| pH ($H_2O$) | 7,34 |
| pH (KCl N) | 6,50 |

La composition moyenne des amendements utilisés, les doses moyennes d'emploi, ainsi que les quantités totales d'éléments minéraux apportés par ces matières organiques depuis le début de l'essai sont indiquées dans le tableau 3.

Les matières organiques ont été enfouies à la bêche dans les 20 premiers centimètres du sol (sauf dans le cas de l'apport de paille en surface), en décembre de chaque année de 1960 à 1966 ; l'essai a été conduit en l'absence de toute culture, afin de simplifier quelque peu l'interprétation des faits observés ; des façons superficielles fréquentes ont maintenu les parcelles sans végétation.

Deux types de prélèvements de sols furent réalisés pendant la durée de l'essai : dans les 20 premiers centimètres tous les mois, et à trois profondeurs (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm) en juillet 1966 et juillet 1967 seulement. Plus de deux ans après la fin de l'essai (avril 1970) un dernier prélèvement a été effectué (0-20 cm).

## MÉTHODES ANALYTIQUES UTILISÉES

— Azote total : méthode Kjeldahl.

— Carbone organique : méthode Anne.

— Azote minéral : méthode Drouineau et Lefèvre (1949) ; les dosages sont effectués en fin d'année sur la terre séchée à l'air ; on a vérifié que le séchage et le stockage d'une durée inférieure à un an ne modifiaient pas sensiblement la teneur en azote minéral des échantillons.

— Extraction et fractionnement de la matière organique :

- méthode chimique (soude 0,1 N) décrite par Delas (1967) ;
- méthode densimétrique de Monnier *et al.* (1962).

— Activité biologique des sols en fin d'essai : technique respirométrique décrite par Juste et Delas (1970).

## RÉSULTATS

### I. — *Évolution quantitative et qualitative des composés humiques*

#### 1. *Évolution de la teneur en matière organique.*

L'évolution du taux de matière organique a été appréciée au moyen des déterminations de la teneur en azote total ou en carbone organique, bien que le dosage du carbone nous ait paru, ainsi qu'à d'autres auteurs (Barbier et Guennelon, 1951 ; Morel *et al.*, 1956 ; Muller, 1966), moins précis que celui de l'azote.

Les teneurs initiales (décembre 1960) et finales (décembre 1967) en azote et

TABLEAU 3

*Caractéristiques des apports de matières organiques effectués de 1960 à 1966*

| Nature des matières organiques | Poids frais des produits organiques épandus (t/ha) | | Composition moyenne des produits organiques utilisés | | | | | | Quantités totales d'éléments apportées par les produits organiques de 1960 à 1966 (kg/ha) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | (en % de la matière sèche) | | | | | | | | |
| | Par an (moyenne) | Total | Matière sèche (%) | N | C | C/N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | N | C | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| T Témoin ..... | 0 | 0 | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S Paille de blé en surface..... | 49 | 343 | 52,4 | 0,41 | 47,64 | 116,19 | 0,10 | 1,09 | 737 | 85 624 | 180 | 1 959 |
| E Paille de blé enfouie..... | 49 | 343 | 52,4 | 0,41 | 47,64 | 116,19 | 0,10 | 1,09 | 737 | 85 624 | 180 | 1 959 |
| M Tiges de maïs ..... | 74 | 518 | 18,5 | 0,50 | 36,58 | 73,16 | 0,19 | 0,79 | 479 | 35 055 | 182 | 757 |
| L Foin de luzerne ..... | 24 | 168 | 80,2 | 2,15 | 44,46 | 20,67 | 0,37 | 1,81 | 2 897 | 59 904 | 499 | 2 439 |
| R Marcs de raisin ..... | 54 | 378 | 27,9 | 2,35 | 48,29 | 20,54 | 0,36 | 1,39 | 2 478 | 50 928 | 380 | 1 466 |
| C Fumier de champignons ..... | 65 | 455 | 55,4 | 0,55 | 8,71 | 15,83 | 0,26 | 0,74 | 1 386 | 21 955 | 655 | 1 865 |
| F Fumier de ferme ..... | 63 | 441 | 28,6 | 1,03 | 36,21 | 35,15 | 0,37 | 1,35 | 1 299 | 45 670 | 466 | 1 703 |

carbone des 20 premiers centimètres de sol sont indiquées au tableau 4. Nous avons complété ces données dans les figures 1 et 2, au moyen des résultats de tous les dosages d'azote et de carbone effectués entre 1960 et 1970.

TABLEAU 4

*Évolution des teneurs en azote et en carbone dans les 20 premiers centimètres de décembre 1960 à décembre 1967*

(moyenne des répétitions)

| Traitements | Azote ‰ de terre fine | | | | Carbone ‰ de terre fine | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1960 | 1967 | p.p.d.s. au seuil | | 1960 | 1967 | p.p.d.s. au seuil | |
| | | | 0,05 | 0,01 | | | 0,05 | 0,01 |
| T Témoin | 0,44 | 0,35 | 0,03 | 0,04 | 5,06 | 4,48 | 0,31 | 0,49 |
| S Paille de blé en surface | 0,43 | 0,66 | 0,10 | 0,16 | 4,81 | 9,50 | 1,58 | 2,48 |
| E Paille de blé enfouie | 0,43 | 0,64 | 0,09 | 0,15 | 5,13 | 9,06 | 0,87 | 1,37 |
| M Tiges de maïs | 0,44 | 0,55 | 0,07 | NS | 4,95 | 7,85 | 0,34 | 0,54 |
| L Foin de luzerne | 0,41 | 0,67 | 0,04 | 0,06 | 5,13 | 7,90 | 0,78 | 1,23 |
| R Marcs de raisins | 0,42 | 1,14 | 0,21 | 0,33 | 4,83 | 12,55 | 2,21 | 3,47 |
| C Fumier de champignons | 0,43 | 0,75 | 0,16 | 0,25 | 4,83 | 9,51 | 0,61 | 0,96 |
| F Fumier de ferme | 0,47 | 0,87 | 0,10 | 0,15 | 5,81 | 11,55 | 1,41 | 2,21 |

Comme on pouvait le prévoir, les divers amendements ont tous contribué, mais de manière différente, à accroître la teneur en matière organique du sol.

Sur les graphiques d'évolution annuelle, il apparaît des irrégularités dans les courbes correspondant à certains traitements ; elles proviennent en grande partie d'erreurs expérimentales difficiles à éviter en plein champ : enfouissement irrégulier des amendements, présence de débris non décomposés dans certains échantillons, variations légères de la profondeur des prélèvements, etc.

L'allure de ces courbes d'évolution doit donc être interprétée avec précaution ; quelques résultats méritent cependant d'être soulignés : pour plusieurs amendements et malgré les quantités apportées, il faut attendre deux ou trois ans avant de voir apparaître des différences notables de teneurs du sol en azote et en carbone par rapport au témoin (tiges de maïs « M », paille de blé « E » et « S »). Certains amendements provoquent un accroissement assez continu — dans l'intervalle de temps 1960-1967 — des teneurs en carbone et en azote : il s'agit des traitements « marcs de raisin R » et dans une moindre mesure « fumier de ferme F » et « fumier de champignons C » ; pour d'autres au contraire, ces teneurs n'augmentent presque plus à partir de 1965 : il semble en être ainsi pour les parcelles « luzerne L » et « tiges de maïs M ». Ces deux comportements traduisent probablement des vitesses de décomposition tout à fait différentes.

L'arrêt des apports, à partir de décembre 1966, provoque une baisse des teneurs en azote et carbone dans les prélèvements d'avril 1970 sauf dans le cas de l'apport de paille en surface (« S ») ; le comportement particulier de ce traitement ne doit pas surprendre : la décomposition de la paille épandue en surface n'a commencé à enrichir le sol sous-jacent qu'en 1963 (jusque-là les teneurs en azote et carbone de ces

parcelles et des parcelles « témoin T » ont évolué de façon identique), et l'arrêt des apports n'a pas interrompu les processus de décomposition et d'enrichissement qui se poursuivront jusqu'à la disparition du mulch.

Les résultats obtenus dans les parcelles « témoin T » doivent être soulignés : ces parcelles, qui n'ont reçu aucun apport pendant la durée de l'essai, ont continué

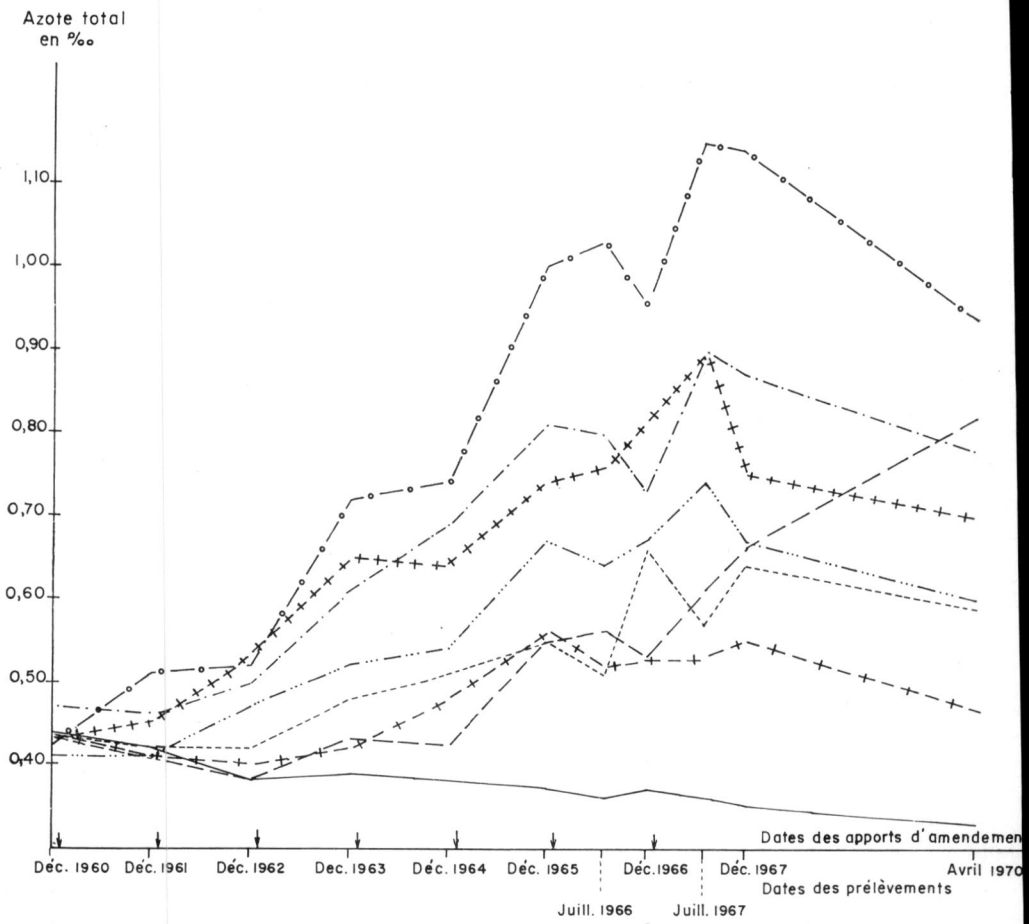



FIG. 1. — *Évolution des teneurs en azote total des 20 premiers cm du sol* (moyenne de 6 rétipétions)

à s'appauvrir bien que leur teneur initiale en matière organique soit très faible. La vitesse moyenne de disparition des composés humiques a été calculée d'après la

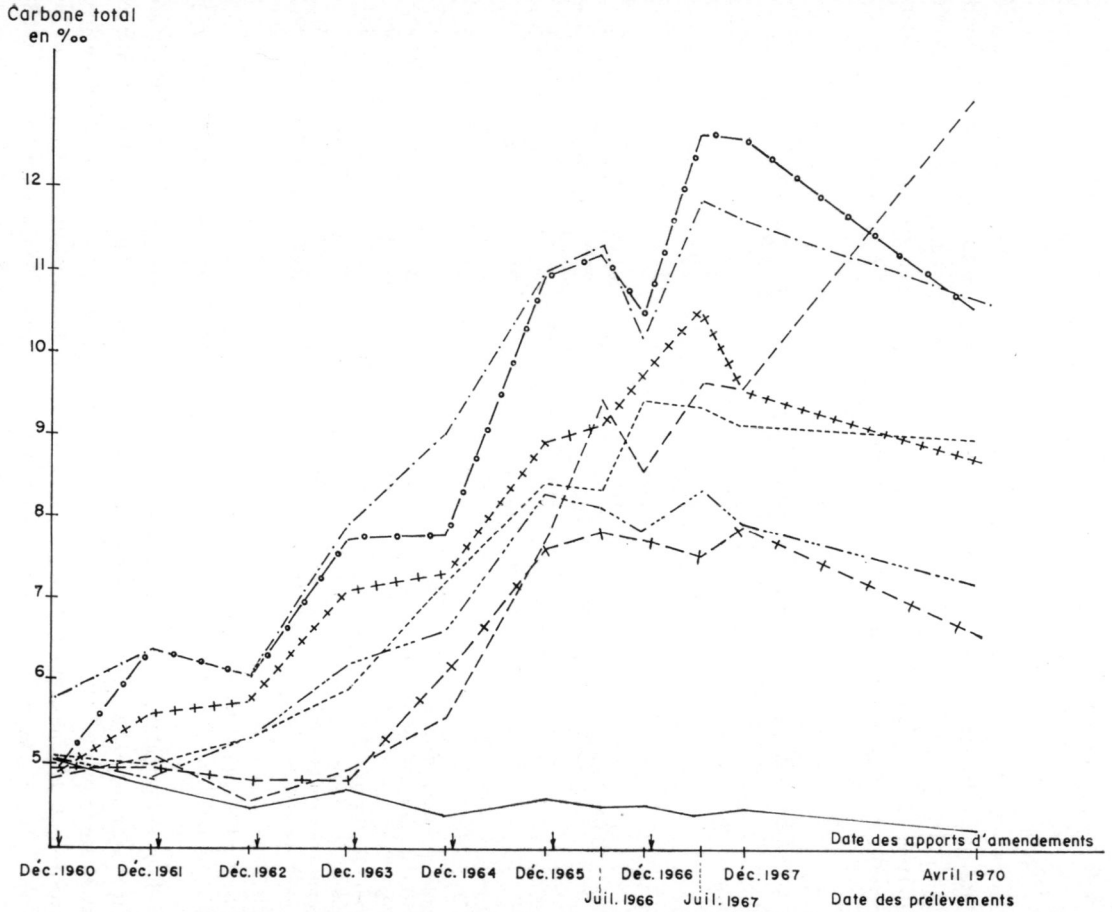



FIG. 2. — *Évolution des teneurs en carbone total des 20 premiers cm du sol* (moyenne de 6 répétitions)

formule de HÉNIN et DUPUIS (1945) ; pour la durée de l'essai (décembre 1960-décembre 1967), cette vitesse s'établit à 3,3 p. 100 par an si on la détermine à partir des variations du taux d'azote et à 1,7 p. 100 si on utilise les variations du taux de carbone. Les mêmes calculs ont été effectués en tenant compte des prélèvements d'avril 1970 ; l'allongement de la période d'observation (décembre 1960-avril 1970) ne modifie pas sensiblement les résultats puisque les vitesses moyennes deviennent alors égales à 3,0 p. 100 dans le cas de l'azote et à 1,9 p. 100 dans celui du carbone.

2. *Essai de bilan de l'azote et du carbone.*

L'enrichissement en azote et carbone des 20 premiers centimètres de sol a été calculé par différence entre les teneurs trouvées en fin d'essai (1967) et les teneurs initiales (1960) de chacun des traitements (voir tabl. 4) ; les valeurs obtenues ont été comparées aux quantités d'azote et de carbone apportées par les amendements (voir tabl. 3). Les résultats de ce calcul sont indiqués dans le tableau 5.

TABLEAU 5

*Bilan de l'azote et du carbone dans les 20 premiers cm en fin d'essai*
(Prélèvements de décembre 1967-Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | Azote | | | Carbone | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Apport par les matières organiques (kg/ha) | Enrichissement du sol sur 20 cm par rapport à 1960 (kg/ha) | Variation par rapport aux apports (%) | Apport par les matières organiques (kg/ha) | Enrichissement du sol sur 20 cm par rapport à 1960 (kg/ha) | Variation par rapport aux apports (%) |
| S Paille de blé en surface .... | 737 | 552 | — 25 | 85 624 | 11 256 | — 87 |
| E Paille de blé enfouie ..... | 737 | 504 | — 32 | 85 624 | 9 432 | — 89 |
| M Tiges de maïs ..... | 479 | 264 | — 45 | 35 055 | 6 960 | — 80 |
| L Foin de luzerne ..... | 2 897 | 624 | — 78 | 59 904 | 6 648 | — 89 |
| R Marcs de raisins ..... | 2 478 | 1 728 | — 30 | 50 928 | 18 528 | — 64 |
| C Fumier de champignons .... | 1 386 | 768 | — 45 | 21 955 | 11 232 | — 51 |
| F Fumier de ferme ..... | 1 299 | 960 | — 26 | 45 670 | 13 776 | — 70 |

N. B. : 1 hectare de terre fine pèse sur 20 cm : 2 400 tonnes.

D'après ce bilan, limité aux 20 premiers centimètres, on ne retrouve dans le sol qu'une fraction de l'azote et du carbone apportés par les amendements ; les pertes sont beaucoup plus importantes dans le cas du carbone que dans celui de l'azote, surtout pour les matières organiques à rapport C/N élevé comme les pailles de blé (« S » et « E ») ; le taux très élevé de disparition du carbone dans ces traitements est la preuve d'une intense activité de microorganismes ; mais il paraît difficile d'admettre qu'un sol très pauvre en azote total et n'ayant reçu aucune fumure azotée minérale ait pu rapidement mettre à la disposition de ces microorganismes tout l'azote indispensable aux décompositions ; ceci nous conduit à envisager l'hypothèse d'une fixation d'azote atmosphérique que le bilan calculé sur 20 centimètres ne permettrait pas de mettre en évidence ; ce bilan est en effet incomplet, du fait de l'entraînement

en profondeur d'une partie de l'azote et du carbone provenant des amendements. Les résultats indiqués dans la figure 3 témoignent de l'importance de cette migration dans le cas de l'azote.

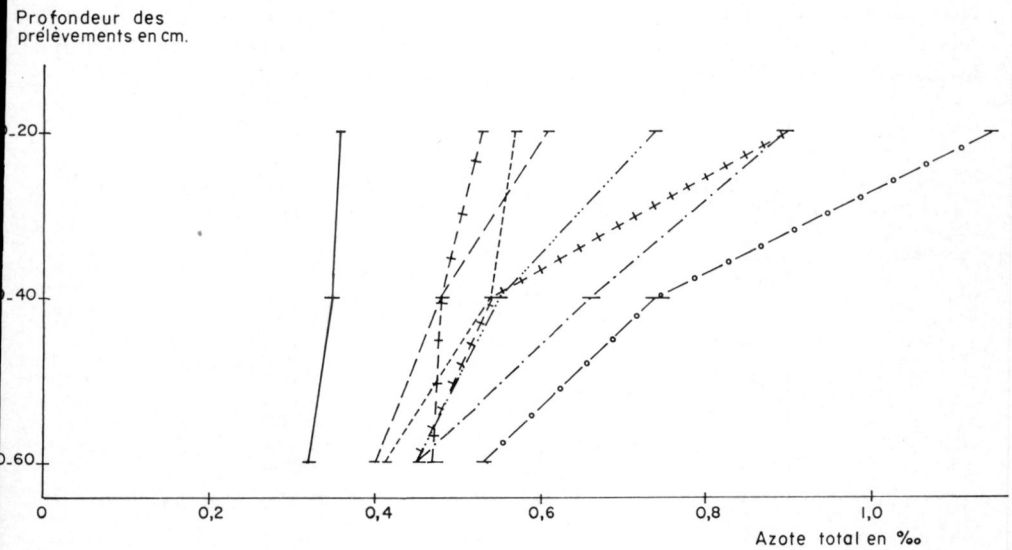



FIG. 3. — *Teneur du sol en azote à la fin de l'essai* (moyenne de 6 répétitions)

Nous avons essayé de procéder à un bilan plus complet, intéressant une profondeur de sol de 60 cm. Nous ne disposons pas, pour ce faire, de prélèvements initiaux (1960) correspondant aux niveaux inférieurs à 20 cm ; une évaluation approximative a cependant été tentée grâce aux prélèvements effectués à 3 profondeurs en juillet 1967, par différence entre les teneurs des parcelles enrichies et des parcelles « témoin T » (tabl. 6). Cependant, les modifications intervenues dans la composition de ces parcelles « témoin T » entre 1960 et 1967, et que nous n'avons pu mesurer que pour les 20 premiers cm, risquent d'introduire dans ce mode de calcul, une importante erreur systématique.

Certains de ces résultats doivent être soulignés :

— Le bilan de l'azote, calculé sur 60 cm, n'est jamais nul ; il est : soit négatif dans le cas du traitement « luzerne L », ce qui correspond pour cette matière organique à rapport C/N bas à des pertes de l'azote minéralisé, soit positif pour tous les autres traitements et plus particulièrement pour la paille de blé (« S » et « E ») et les tiges de maïs « M ». Les résultats de ce nouveau mode de calcul ne semblent donc pouvoir s'interpréter qu'en faisant intervenir une fixation d'azote atmosphérique au cours de la décomposition des matières organiques à C/N élevé, mais les données recueillies au cours d'une étude dont nous avons déjà souligné les limites ne nous permettent pas de chiffrer avec une précision raisonnable l'importance du phénomène.

— Pour le carbone, et quel que soit le mode de calcul du bilan utilisé, les quantités retrouvées sont toujours inférieures aux apports ; les pertes de carbone sont dues, pour une large part, à un dégagement de $CO_2$. Le foin de luzerne (« L ») est le seul amendement dont l'enfouissement provoque à la fois des pertes d'azote et de carbone :

cette matière organique à rapport C/N faible se décompose particulièrement facilement, même dans un sol très pauvre en azote, et de ce fait, elle enrichit assez peu le sol en composés humiques. Par contre, pour tous les autres amendements, les pertes de carbone sont d'autant plus fortes que leur rapport C/N est plus haut : le fumier de champignon (« C », C/N = 16), le fumier de ferme (« F », C/N = 35), les marcs de raisins (« R », C/N = 21) laissent beaucoup plus de résidus carbonés dans le sol que les tiges de maïs (« M », C/N = 73) et les pailles de blé (« S » et « E », C/N = 116) ; ces

TABLEAU 6

*Bilan de l'azote et du carbone sur 60 cm en fin d'essai*
(Prélèvements de juillet 1967 — Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | Azote | | | Carbone | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Apport par les matières organiques (kg/ha) | Enrichissement du sol sur 60 cm par rapport au témoin de juil. 1967 (kg/ha) | Variation par rapport aux apports (%) | Apport par les matières organiques (kg/ha) | Enrichissement du sol sur 60 cm par rapport au témoin de juil. 1967 (kg/ha) | Variation par rapport aux apports (%) |
| S Paille de blé en surface .... | 737 | 1 272 | + 73 | 85 624 | 21 312 | — 75 |
| E Paille de blé enfouie..... | 737 | 1 128 | + 53 | 85 624 | 23 328 | — 73 |
| M Tiges de maïs ..... | 479 | 864 | + 80 | 35 055 | 11 928 | — 66 |
| L Foin de luzerne ..... | 2 897 | 1 656 | — 3 | 49 904 | 13 824 | — 77 |
| R Marcs de raisin ..... | 2 478 | 3 288 | + 33 | 50 928 | 31 128 | — 39 |
| C Fumier de champignons ... | 1 386 | 2 016 | + 45 | 21 955 | 17 184 | — 22 |
| F Fumier de ferme ..... | 1 299 | 2 304 | + 77 | 45 670 | 18 992 | — 37 |

N. B. : 1 hectare de terre fine pèse sur 60 cm : 7 200 tonnes.

résultats confirment les observations de MULLER (1966). La fraction du carbone des amendements transformée en carbone organique — ou coefficient isohumique — apparaît, dans nos conditions expérimentales, plus élevée que dans des travaux analogues (MULLER, 1966 ; HÉNIN *et al.*, 1969) ; ceci est vraisemblablement dû au fait que, dans notre essai, l'évolution des matières organiques épandues chaque année n'était pas terminée au moment des prélèvements effectués en vue de déterminer ce coefficient.

3. *Évolution des formes de matière organique.*

Il était intéressant de savoir si l'accroissement des teneurs en azote et carbone provoqué par les amendements avait entraîné des modifications qualitatives des composés humiques ; pour cette étude, nous avons utilisé deux méthodes d'extraction et de fractionnement de la matière organique des sols (prélèvements de décembre 1967).

TABLEAU 7

*Quantités d'azote et de carbone du sol* (0-20 cm) *contenues dans les acides humiques et fulviques en fin d'essai* (décembre 1967)
(Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | Azote ‰ de terre fine | | | | Carbone ‰ de terre fine | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Acides fulviques | Acides humiques | N total du sol | % N du sol humifié * | Acides fulviques | Acides humiques | C total du sol | % C du sol humifié * |
| T Témoin | 0,096 | 0,070 | 0,35 | 47,4 | 1,38 | 1,14 | 4,48 | 56,2 |
| S Paille de blé en surface | 0,121 | 0,123 | 0,66 | 36,9 | 1,91 | 2,16 | 9,50 | 42,8 |
| E Paille de blé enfouie | 0,109 | 0,119 | 0,64 | 35,6 | 1,89 | 2,14 | 9,06 | 44,4 |
| M Tiges de maïs | 0,104 | 0,103 | 0,55 | 37,6 | 1,81 | 1,75 | 7,85 | 45,3 |
| L Foin de luzerne | 0,144 | 0,145 | 0,67 | 43,1 | 1,66 | 1,88 | 7,90 | 44,8 |
| R Marcs de raisin | 0,145 | 0,138 | 1,14 | 24,8 | 1,99 | 1,79 | 12,55 | 30,1 |
| C Fumier de champignons | 0,123 | 0,141 | 0,75 | 35,2 | 1,55 | 1,88 | 9,51 | 36,0 |
| F Fumier de ferme | 0,131 | 0,149 | 0,87 | 32,1 | 1,97 | 2,09 | 11,55 | 33,1 |

$$* \% \text{ N (ou C) du sol humifié} = \frac{\text{N (ou C) des acides fulviques} + \text{N (ou C) des acides humiques}}{\text{N (ou C) total du sol}} \times 100.$$

TABLEAU 8

*Teneurs en azote et carbone des fractions lourdes et légères isolées par la méthode densimétrique en fin d'essai* (décembre 1967)
(Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | Azote | | | | Carbone | | | | C/N | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fraction lourde | | Fraction légère | | Fraction lourde | | Fraction légère | | Fraction lourde | Fraction légère |
| | Teneur en °/oo de terre fine | % du N total | Teneur en °/oo de terre fine | % du N total | Teneur en °/oo de terre fine | % du C total | Teneur en °/oo de terre fine | % du C total | | |
| T Témoin | 0,26 | 74,0 | 0,09 | 26,0 | 2,96 | 66,0 | 1,50 | 33,0 | 11,4 | 16,7 |
| S Paille de blé en surface | 0,24 | 36,0 | 0,42 | 64,0 | 3,32 | 35,0 | 6,17 | 65,0 | 13,8 | 14,7 |
| E Paille de blé enfouie | 0,38 | 59,0 | 0,26 | 41,0 | 4,60 | 51,0 | 4,44 | 49,0 | 12,1 | 17,1 |
| M Tiges de maïs | 0,39 | 71,0 | 0,15 | 27,0 | 5,24 | 67,0 | 2,60 | 33,0 | 13,4 | 17,3 |
| L Foin de luzerne | 0,41 | 61,0 | 0,25 | 37,0 | 4,65 | 59,0 | 3,23 | 41,0 | 11,3 | 12,9 |
| R Marcs de raisin | 0,34 | 30,0 | 0,80 | 70,0 | 3,88 | 31,0 | 8,65 | 69,0 | 11,4 | 10,8 |
| C Fumier de champignons | 0,37 | 50,0 | 0,37 | 50,0 | 4,75 | 50,0 | 4,73 | 50,0 | 12,8 | 12,8 |
| F Fumier de ferme | 0,55 | 63,0 | 0,30 | 34,0 | 6,88 | 60,0 | 4,65 | 40,0 | 12,5 | 15,5 |

a) *Méthode chimique* (extraction par la soude 0,1 N).

Les teneurs en azote et carbone des acides fulviques et humiques sont indiquées au tableau 7.

Tous les amendements ont accru les quantités d'azote et de carbone contenues dans les fractions fulviques et humiques, mais l'enrichissement, qui varie selon les matières organiques, est plus important dans le cas des acides humiques ; le rapport C/N des deux fractions reflète dans une large mesure celui des matières organiques qui leur ont donné naissance, ce qui semble indiquer que les phénomènes d'humification ne sont pas terminés.

Pour trois traitements (marcs de raisins « R », fumier de champignons « C », fumier de ferme « F »), les pourcentages d'azote et de carbone humifiés sont nettement inférieurs à ceux des autres traitements ; ce résultat est à rapprocher des observations précédentes concernant la plus faible vitesse de décomposition de ces trois amendements. Par contre, dans le cas des tiges de maïs « M », les pourcentages d'azote et de carbone humifiés sont assez élevés.

b) *Méthode densimétrique.*

Les teneurs en azote et en carbone des fractions lourdes et légères sont indiquées dans le tableau 8.

On peut craindre en sol très sableux que la séparation entre matière humifiée et débris organiques peu décomposés ne soit difficile (GREENLAND, 1965 ; DELAS, 1967) ; mais il est possible de s'assurer que cette séparation a bien eu lieu en vérifiant que les composés humifiés de la fraction lourde ont un rapport C/N nettement inférieur aux débris peu décomposés inclus dans la fraction légère (MONNIER *et al.*, 1962 ; HÉNIN *et al.*, 1969).

Or, pour 4 amendements : « paille de blé en surface S », « foin de luzerne L », « marcs de raisins R » et « fumier de champignons C », les rapports C/N des deux fractions sont identiques ; la méthode densimétrique n'a donc pas permis de séparer des composés humiques à des stades d'évolution différents. Par contre, dans le cas des traitements « témoin T », « paille de blé enfouie E », « tiges de maïs M » et « fumier de ferme F », nous avons mis en évidence deux fractions nettement différenciées. Les tiges de maïs (« M ») ont en particulier donné naissance en 7 ans à une importante quantité de produits humifiés intimement liés à la matière minérale et que l'on retrouve dans la fraction lourde.

4. *Activité biologique.*

Afin d'évaluer globalement l'incidence des apports d'amendements sur les propriétés biologiques des sols, nous avons mesuré, par une technique respirométrique, leur activité biologique en fin d'essai ; les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 9.

Les volumes d'oxygène absorbés pendant 48 heures (à 28°C) varient beaucoup selon les traitements, mais si l'on rapporte cette absorption à la teneur en carbone total du sol correspondant, les différences s'atténuent nettement : tout se passe comme si l'activité biologique dépendait essentiellement du taux de carbone du sol, ainsi que l'ont déjà noté STOUT et DUTCH (1968). Ces résultats peuvent paraître en contradiction avec nos observations précédentes concernant les différences de perte de carbone entre les traitements ; en fait, cette contradiction n'est qu'appa-

rente : alors que les pertes de carbone sont vraisemblablement les plus importantes et aussi les plus variables selon les amendements dans la période qui suit immédiatement leur épandage, les mesures d'activité biologique ont été effectuées sur des échantillons prélevés 12 mois après le dernier apport d'amendement, dans une phase d'évolution assez lente des matières organiques.

TABLEAU 9

*Activité microbiologique des sols en fin d'essai* (décembre 1967)
(Moyenne des déterminations faites sur deux blocs)

| Traitements | µl $O_2$ absorbés en 48 heures par g de terre fine | Carbone ‰ de terre fine | µl $O_2$ absorbés en 48 heures par mg de C |
|---|---|---|---|
| T Témoin | 68,21 | 4,30 | 15,86 |
| S Paille de blé en surface | 170,36 | 10,35 | 16,45 |
| E Paille de blé enfouie | 159,47 | 8,65 | 18,43 |
| M Tiges de maïs | 139,82 | 7,70 | 18,15 |
| L Foin de luzerne | 154,96 | 7,60 | 20,38 |
| R Marcs de raisins | 191,99 | 11,30 | 16,99 |
| C Fumier de champignons | 137,39 | 10,25 | 13,40 |
| F Fumier de ferme | 210,45 | 10,80 | 19,48 |

Quoi qu'il en soit, tous les amendements semblent conférer au sol une activité biologique supérieure à celle du témoin, à l'exception du fumier de champignon qui provoque une diminution sensible de cette activité : c'est la conséquence de la teneur élevée en calcium de cet amendement dont le rôle stabilisateur de la matière organique a été récemment souligné (JUSTE et DELAS, 1970).

5. *Évolution de l'azote minéral.*

Cette étude n'intéresse en fait qu'une fraction de l'azote minéral : les analyses n'ont concerné que les 20 premiers centimètres du sol ; de plus, l'azote minéral des prélèvements des mois d'hiver n'a pas toujours été déterminé en raison des difficultés de dosage des très faibles quantités, si bien que les chiffres obtenus se rapportent à 66 des 84 mois qu'a duré l'essai.

Malgré le caractère partiel des données recueillies, il est cependant possible de se faire une idée assez précise de l'évolution de l'azote minéral dans un sol sableux ayant reçu divers types d'amendements organiques.

a) *Évolution globale.*

Les résultats sont résumés dans le tableau 10 où nous avons indiqué, pour les 7 années de l'essai, les quantités maximales d'azote minéral trouvées pour chacun des traitements.

Les quantités d'azote minéral ne sont jamais très importantes ; elles varient selon les années et les amendements. Les teneurs sont relativement élevées dans le cas du traitement « luzerne L », moyennes pour les traitements « fumier de ferme F », « fumier de champignons C » et « marcs de raisin R » ; faibles enfin pour les traite-

TABLEAU 10

*Quantités maximales d'azote minéral dans les 20 premiers centimètres*

(Unités/ha — Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | 1961 | 1962 | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T Témoin | 23 (octobre) | 40 (septembre) | 30 (mai) | 27 (août) | 21 (juin) | 27 (mars) | 33 (juin) |
| S Paille de blé en surface | 23 (juin) | 40 (septembre) | 29 (juin) | 29 (septembre) | 21 (août) | 35 (mars) | 39 (août) |
| E Paille de blé enfouie | 24 (avril) | 30 (septembre) | 30 (juin) | 31 (août) | 20 (juillet) | 29 (mai) | 32 (juillet) |
| M Tiges de maïs | 27 (octobre) | 35 (septembre) | 30 (septembre) | 36 (juillet) | 30 (juin) | 32 (mai) | 32 (août) |
| L Foin de luzerne | 65 (septembre) | 167 (septembre) | 32 (septembre) | 58 (septembre) | 92 (juin) | 49 (mars) | 102 (août) |
| R Marcs de raisin | 30 (septembre) | 81 (septembre) | 43 (juin) | 43 (août) | 48 (juin) | 42 (septembre) | 74 (août) |
| C Fumier de champignons | 34 (août) | 79 (septembre) | 45 (juillet) | 44 (septembre) | 43 (juin) | 28 (septembre) | 72 (août) |
| F Fumier de ferme | 50 (octobre) | 69 (septembre) | 30 (juillet) | 65 (septembre) | 54 (août) | 45 (septembre) | 57 (août) |

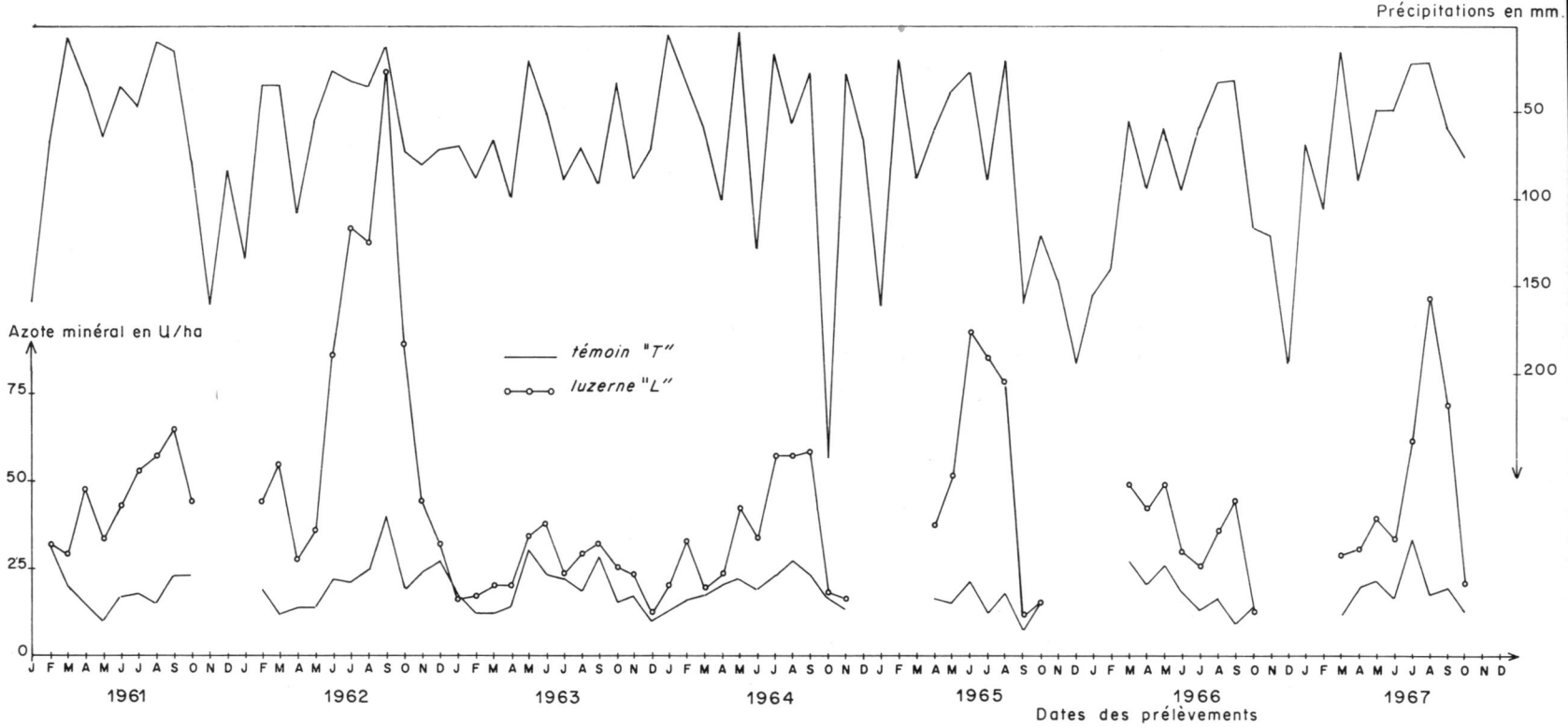



FIG. 4. — *Évolution mensuelle des teneurs en azote minéral des 20 premiers cm*
(en U/ha ; moyenne de 6 répétitions)

ments « témoin T », « paille de blé en surface S », « paille de blé enfouie E » et « tiges de maïs M ».

Si l'on admet qu'il y a probablement eu, dans nos conditions expérimentales, fixation d'azote atmosphérique dans les parcelles ayant reçu des matières organiques à rapport C/N élevé, on peut penser que l'azote minéral dosé provient, en partie au moins, de la minéralisation de cet azote fixé.

b) *Évolution mensuelle.*

La présentation de l'ensemble des résultats mensuels des huit traitements pour 7 années est matériellement très difficile ; mais les courbes d'évolution des taux d'azote minéral dans les 20 premiers centimètres du sol ayant, dans tous les cas, des allures semblables pour une même année, nous avons pu nous limiter à donner les résultats concernant deux traitements : celui qui conduit à la plus faible production d'azote minéral (« témoin T ») et celui qui entraîne la plus forte (« luzerne L ») (fig. 4).

Le taux d'azote minéral, faible en hiver, croît en général assez nettement à partir du mois de mai ; le maximum est atteint en été, le plus souvent au mois de septembre. Les différences entre les années sont considérables, surtout en présence d'apports de matières organiques, tant en ce qui concerne l'allure de la courbe qu'en ce qui concerne la valeur du maximum ; en 1962, 1965 et 1967, la production d'azote minéral a été relativement importante ; en 1963 et 1966, par contre, elle a été plus réduite. Les conditions climatiques et en particulier les précipitations semblent jouer un rôle dans ces fluctuations ; aux périodes de sécheresse accusée correspondent en général les teneurs les plus élevées en azote minéral (exemple : septembre 1962) ; inversement, les premières pluies importantes de fin d'été ou d'automne provoquent une disparition rapide de l'azote minéral présent dans les 20 premiers centimètres du sol (exemple : septembre-octobre 1962 ou septembre 1965).

Malgré ces fluctuations, les teneurs en azote minéral sont restées, dans l'ensemble, faibles et les différences entre traitements minimes : ceci est dû pour une large part à la nature sableuse du sol de l'essai qui rend très facile l'entraînement en profondeur des formes minérales de l'azote.

## II. — *Évolution de quelques propriétés des sols étudiés*

1. *pH.*

Les pH des sols des divers traitements en début et en fin d'essai sont indiqués au tableau 11.

La légère acidification des parcelles « témoin T » doit résulter d'un entraînement en profondeur de cations échangeables.

Par ailleurs, la plupart des amendements ont provoqué une baisse du pH, particulièrement sensible dans le cas du foin de luzerne (« L »), des marcs de raisin (« R ») et de la paille de blé enfouie (« E ») ; cette acidification est très vraisemblablement une conséquence de l'apparition, dans un sol sableux non tamponné, de composés humiques provenant de la décomposition des matières organiques.

Le fumier de champignons (« C ») enrichi en calcaire fin pour les besoins de la culture des champignons, alcalinise le sol.

2. *Capacité d'échange de cations* (CEC).

La capacité d'échange du sol de toutes les parcelles a été déterminée en fin d'essai (tabl. 12).

Les divers types de matière organique ont provoqué des accroissements importants de la capacité d'échange de cations qui passe de 3 méq./100 g pour les parcelles « témoin T » à 7 méq./100 g pour le traitement « marcs de raisin R ». La corrélation entre les valeurs de la CEC et les teneurs en azote et carbone des sols des différents traitements est très hautement significative (fig. 5) ; c'est une conséquence de la très faible teneur de ces sols en colloïdes minéraux.

TABLEAU II

*Évolution du pH des 20 premiers centimètres de décembre 1960 à décembre 1967*
(Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | pH eau | | | | pH KCl N | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1960 | 1967 | p.p.d.s. au seuil | | 1960 | 1967 | p.p.d.s. au seuil | |
| | | | 0,05 | 0,01 | | | 0,05 | 0,01 |
| T Témoin | 7,24 | 6,57 | 0,45 | 0,65 | 6,35 | 6,16 | NS | NS |
| S Paille de blé en surface | 7,27 | 6,52 | 0,35 | 0,56 | 6,32 | 5,92 | 0,34 | NS |
| E Paille de blé enfouie | 7,57 | 6,26 | 0,28 | 0,43 | 6,80 | 5,70 | 0,22 | 0,34 |
| M Tiges de maïs | 7,41 | 6,40 | 0,31 | 0,49 | 6,61 | 5,86 | 0,32 | 0,51 |
| L Foin de luzerne | 7,37 | 5,95 | 0,32 | 0,50 | 6,45 | 5,43 | 0,47 | 0,73 |
| R Marcs de raisin | 7,17 | 6,05 | 0,18 | 0,28 | 6,35 | 5,47 | 0,25 | 0,39 |
| C Fumier de champignons | 7,33 | 7,79 | 0,13 | 0,21 | 6,54 | 7,51 | 0,14 | 0,22 |
| F Fumier de ferme | 7,37 | 7,08 | NS | NS | 6,65 | 6,70 | NS | NS |

TABLEAU 12

*Relation entre la capacité d'échange en cations et les teneurs en azote et carbone en fin d'essai*
(décembre 1967 — Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | Azote (‰) | Carbone (‰) | CEC (méq. % g) |
|---|---|---|---|
| T Témoin | 0,35 | 4,48 | 3,15 |
| S Paille de blé en surface | 0,66 | 9,50 | 5,30 |
| E Paille de blé enfouie | 0,64 | 9,06 | 4,70 |
| M Tiges de maïs | 0,55 | 7,85 | 4,36 |
| L Foin de luzerne | 0,67 | 7,90 | 4,10 |
| R Marcs de raisin | 1,14 | 12,55 | 6,96 |
| C Fumier de champignons | 0,75 | 9,51 | 5,35 |
| F Fumier de ferme | 0,87 | 11,55 | 5,68 |

Cette corrélation étroite signifie que tous les types de composés humiques, à quelque fraction qu'ils appartiennent, participent à la CEC. En outre, la capacité d'échange propre à la matière organique ne dépend pas de l'amendement apporté au sol ; elle est, dans tous les cas, égale à environ 220 méq./100 g de matière organique (à 50 p. 100 de carbone), et cette valeur est en accord avec les données de la littérature (RUSSEL, 1954).

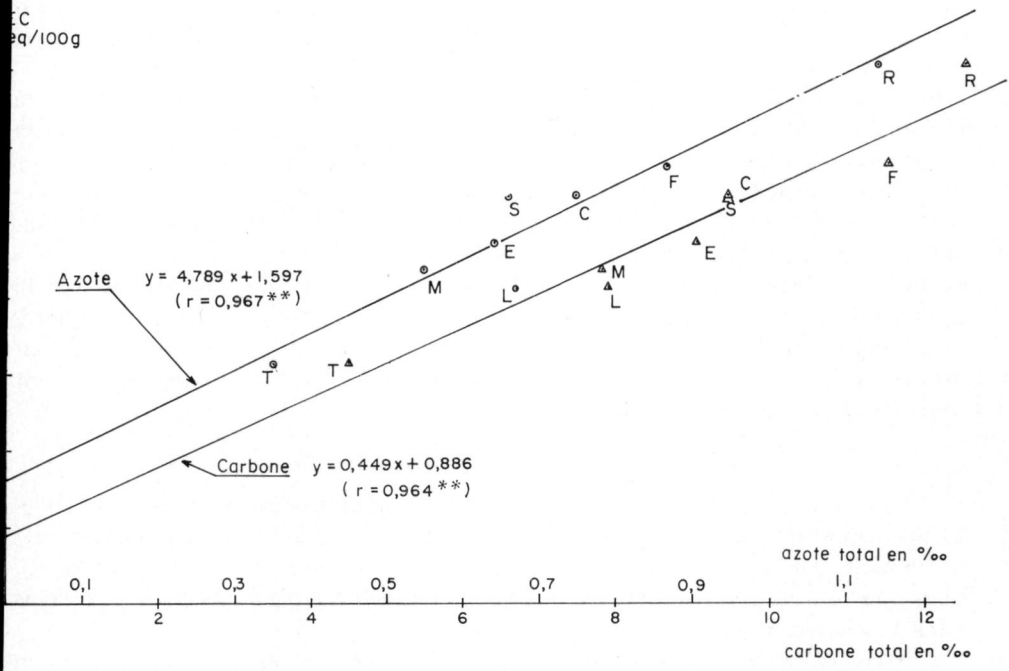



FIG. 5. — *Relation entre la capacité d'échange de cations* (CEC) *et les teneurs en azote et carbone* (moyenne de 6 répétitions)

3. *Capacité de rétention pour l'eau.*

Les résultats des déterminations effectuées en fin d'essai sont indiquées au tableau 13.

La capacité de rétention est faible en sol sableux ; néanmoins, les apports d'amendements ont provoqué des accroissements allant jusqu'à 30 p. 100, ce qui représente

TABLEAU 13

*Humidité équivalente en fin d'essai* (décembre 1967)
(Moyenne des 6 répétitions)

| Traitements | Humidité équivalente p. 100 terre fine |
|---|---|
| T Témoin | 7,28 |
| S Paille de blé en surface | 9,66 |
| E Paille de blé enfouie | 8,93 |
| M Tiges de maïs | 8,63 |
| L Foin de luzerne | 8,68 |
| R Marcs de raisin | 9,33 |
| C Fumier de champignons | 9,65 |
| F Fumier de ferme | 9,55 |
| P.p.d.s. 0,05 | 0,59 |
| P.p.d.s. 0,01 | 0,80 |

une quantité d'eau supplémentaire retenue à l'hectare de près de 60 t ; cette augmentation n'est pas proportionnelle aux teneurs en azote et en carbone du sol des divers traitements.

L'efficacité du mulching (traitement « S »), remarquée depuis longtemps dans la pratique agricole, était attribuée à l'action physique de la couverture du sol par la paille ; mais les résultats précédents montrent que cette efficacité, comme celle des autres amendements, est en fait la conséquence de modifications de la composition du sol. Il semble qu'il faille, après MULLER et BRUN (1970), l'attribuer à l'augmentation du taux de carbone des premiers centimètres du sol, même si le mulching a plus accru la capacité de rétention que ne l'a fait la paille enfouie, sans avoir enrichi davantage le sol en carbone ; il est en effet très vraisemblable qu'il y a eu dans notre essai, sous le mulch, une répartition du carbone semblable à celle constatée par MULLER et BRUN (1970), que nos prélèvements, profonds de 20 centimètres, n'ont pas permis de mettre en évidence.

4. *Teneurs en $K_2O$ et Mg échangeables et en $P_2O_5$ assimilable.*

Du fait de l'importante quantité d'éléments minéraux contenus dans les amendements, il était intéressant de mesurer en fin d'essai l'enrichissement du sol en éléments assimilables ; mais, en raison de la migration de l'azote en profondeur (voir fig. 3), nous pouvions nous attendre à une migration parallèle des éléments minéraux inclus dans la matière organique.

Nous avons donc procédé aux dosages de la potasse ($K_2O$) et du magnésium (Mg) échangeables ainsi qu'à celui de l'acide phosphorique ($P_2O_5$) assimilable dans les prélèvements de juillet 1967 à trois profondeurs ; les résultats sont indiqués sous forme de graphiques.

a) *Potasse échangeable* (fig. 6).

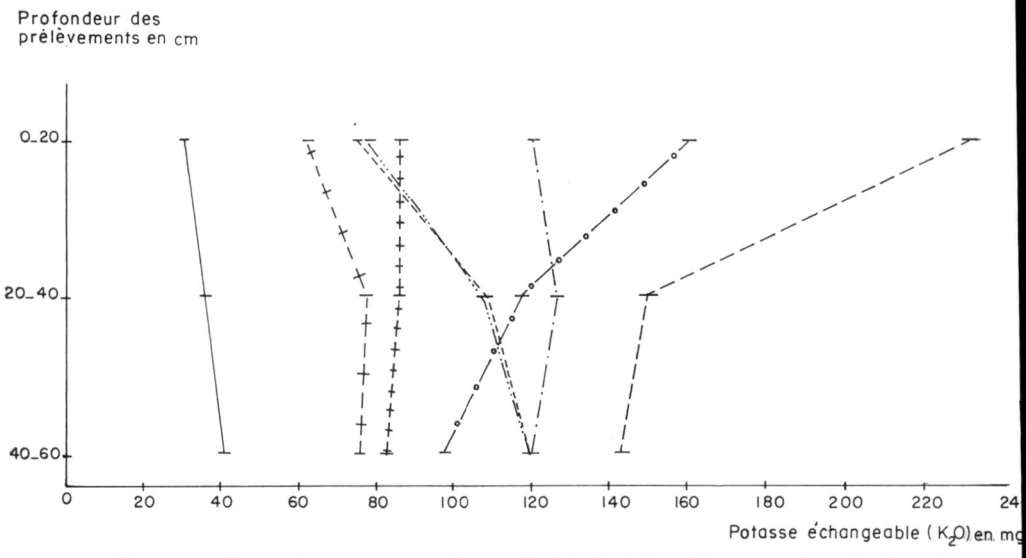



FIG. 6. — *Teneur du sol en potasse échangeable à la fin de l'essai* (moyenne de 6 répétitions).

Les apports d'amendements ont fortement accru les teneurs en potasse échangeable dans les trois horizons ; l'enrichissement a même très probablement intéressé les couches de sol au-delà de 60 cm, puisqu'on trouve encore à ce niveau entre 2 et 4 fois plus de potasse que dans la parcelle témoin. COURPRON (1969) a déjà signalé l'importance du lessivage du potassium dans les sols sableux ; l'allure des courbes de répartition dans le profil nous donne quelques renseignements sur la migration au-delà de 60 cm : dans le cas de la luzerne (traitement « L ») et de la paille enfouie (traitement « E »), cette migration est probablement très importante ; elle est beaucoup plus faible dans le cas de paille apportée en surface (traitements « S ») et dans le cas du marc de raisin (traitement « R »).

Si l'on compare l'enrichissement en potasse échangeable sur 60 cm (déduction faite de la potasse du témoin) aux apports réalisés (tels qu'ils figurent au tableau 3), il apparaît que les quantités retrouvées varient entre 20 et 50 p. 100 des quantités apportées.

b) *Magnésium échangeable* (fig. 7).

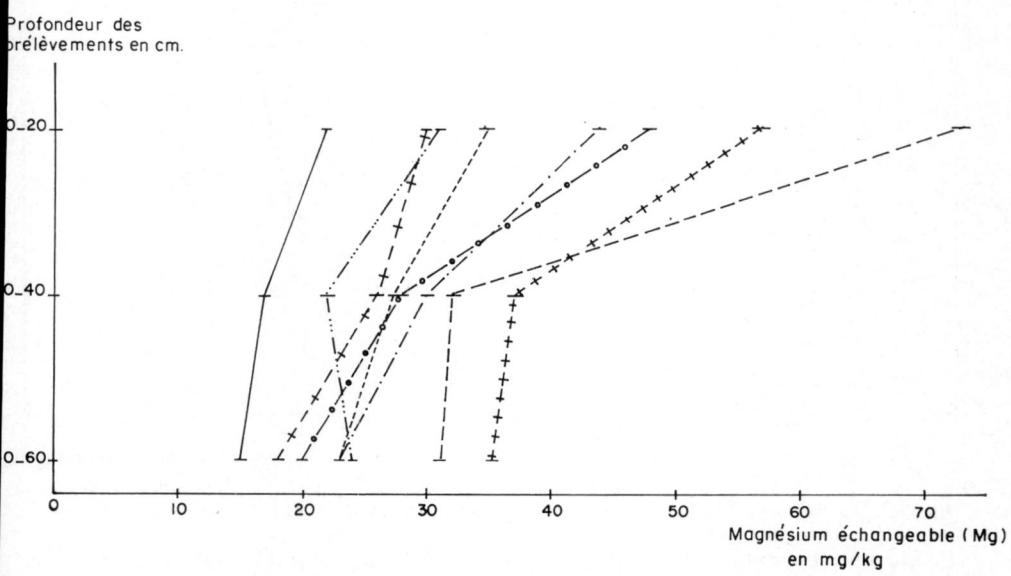



FIG. 7. — *Teneur du sol en magnésium échangeable à la fin de l'essai* (moyenne de 6 répétitions)

R marcs de raisin
F fumier de ferme
C fumier de champignon
L foin de luzerne
S paille de blé en surface
E paille de blé enfouie
M tige de maïs
T témoin

L'enrichissement provoqué par les amendements est également très important ; cependant, l'allure des courbes de répartition du magnésium le long du profil laisse supposer que cet élément migre moins facilement en profondeur que le potassium : à 60 cm on ne trouve, selon les traitements, que 1,2 à 2,3 fois plus de magnésium que dans les parcelles témoin « T ».

La luzerne (traitement « L ») semble enrichir davantage les horizons inférieurs, ainsi que la paille apportée en surface (traitement « S ») et le fumier de champignons (traitement « C »).

Le magnésium n'ayant pas été dosé dans les amendements, il n'a pas été possible de relier l'enrichissement aux apports.

c) *Acide phosphorique assimilable* (fig. 8).

Les résultats correspondant au traitement « fumier de champignons C » ne sont pas portés sur ce graphique, car le réactif d'extraction utilisé (acide citrique 2 p. 100 de DYER) ne convient pas dans le cas de ce sol enrichi en calcaire.

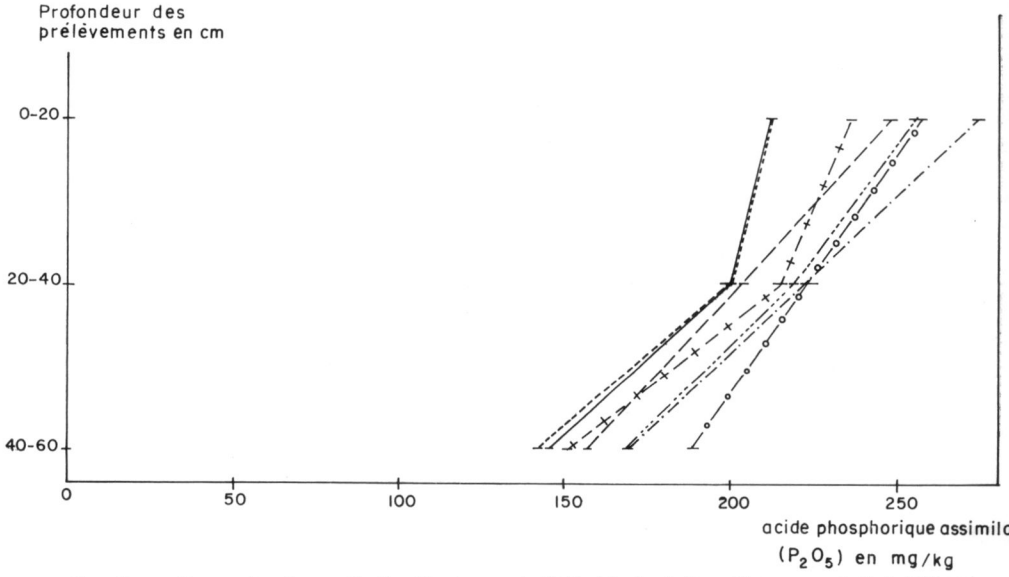



FIG. 8. — *Teneur du sol en acide phosphorique assimilable à la fin de l'essai* (moyenne de 6 répétitions)

L'accroissement de la teneur en acide phosphorique assimilable est assez modeste, car les apports par les amendements ont été peu importants (voir tabl. 3). Mais l'augmentation, hormis le cas du traitement « paille enfouie E », est loin d'être négligeable et intéresse l'ensemble du profil étudié : cette observation confirme l'importance du rôle de la matière organique dans l'entraînement en profondeur des composés phosphatés.

## CONCLUSIONS

Dans cette étude, nous avons cherché à mesurer en un temps court les conséquences d'un enrichissement massif en matières organiques sur les propriétés d'un sol sableux très pauvre en composés humiques ; au point de vue méthodologique, ce

genre de recherches se heurte à deux types de difficultés : erreurs expérimentales importantes inhérentes à la technique des microparcelles établies en plein champ ; d'autre part, risque de voir les quantités d'amendements mises en jeu modifier la nature des phénomènes observés et non pas seulement leur intensité. C'est pourquoi certains des résultats de notre travail demandent à être confirmés.

En l'absence de tout apport organique pendant la durée de l'essai, la diminution du taux de matière organique du sol a été importante puisqu'elle s'est faite à la vitesse de 2 p. 100 par an environ. Dans le cas de la culture de la vigne en sol sableux où les restitutions humiques sont très faibles, le phénomène doit avoir la même intensité ; on peut donc redouter que la disparition progressive du seul colloïde présent dans de tels sols n'entraîne une dégradation de leurs propriétés chimiques et physiques (DELAS et MOLOT, 1968).

L'action des apports d'amendements nous a permis de mettre en évidence les propriétés des sols sableux qui dépendent le plus de leur teneur en matière organique : il s'agit de la capacité d'échange de cations, de la capacité de rétention pour l'eau, de l'activité biologique, de la teneur en éléments fertilisants, que les épandages d'amendements ont beaucoup accrues ; d'autres caractéristiques de ces sols ont été modifiées, mais dans une moindre proportion : tel est le cas de l'aptitude à la production d'azote minéral, mais c'est probablement une conséquence de la nature sableuse du sol qui favorise l'entraînement en profondeur des formes minérales de l'azote. En outre, il est vraisemblable que d'autres propriétés non mesurées dans cette expérimentation ont été également modifiées.

Les divers amendements étudiés se décomposent de manière différente. Le foin de luzerne (traitement « L ») , en raison de sa teneur élevée en azote, se révèle être la matière organique minéralisant le plus facilement ; mais cette aptitude en fait le traitement qui entraîne le moindre accroissement des teneurs en azote et en carbone totaux. Les autres matières organiques se décomposent d'autant plus rapidement que leur rapport C/N est élevé : les pailles de blé (« S » et « E ») et les tiges de maïs (« M »), en raison d'une évolution plus poussée, enrichissent moins le sol en carbone total que les marcs de raisin (« R »), le fumier de champignons (« C ») et le fumier de ferme (« F »). Il faut souligner que les marcs de raisin ont un comportement voisin du fumier de ferme : ce résultat devrait inciter les viticulteurs à réincorporer au sol ce sous-produit de la viticulture (DELAS, 1967).

Dans nos conditions expérimentales, il n'a pas été possible d'établir un bilan exact de l'azote et du carbone ; cependant, certains faits observés au cours de cette étude ne semblent pouvoir s'interpréter qu'en faisant intervenir une fixation d'azote atmosphérique au cours de la décomposition, dans un sol très pauvre en azote et en l'absence de fumure azotée minérale, de matières organiques à rapport C/N élevé comme la paille de blé et les tiges de maïs ; les résultats obtenus, qui doivent être confirmés, ne permettent cependant pas d'évaluer l'importance de cette fixation.

En ce qui concerne la production de substances humiques stables, les tiges de maïs (« M ») constituent l'amendement le plus efficace : on peut donc s'attendre à ce que la monoculture du maïs sur de vastes étendues dans les sables des Landes provoque, du fait de l'enfouissement des tiges, des modifications quantitatives et qualitatives des composés humiques de ces sols. Par ailleurs, les tiges de maïs pourraient peut-être constituer un amendement intéressant dans les régions où les sources de matières organiques sont devenues rares (vignoble bordelais par exemple).

Malgré les différences dues à la nature des amendements utilisés, certaines propriétés des sols prélevés en fin d'essai quand la phase de décomposition très rapide est terminée, semblent essentiellement sous la dépendance des teneurs en azote ou en carbone totaux : il en est ainsi de l'activité biologique du sol et de la capacité d'échange de cations ; l'étroite corrélation entre CEC et taux d'azote ou de carbone permet, en sol sableux, d'évaluer rapidement la capacité d'échange à partir des résultats de dosage d'azote ou de carbone.

Effectué dans un sol viticole sableux typique, maintenu sans végétation, ce travail apporte des éléments de solution au problème de l'entretien humique des sols de vigne, problème qui se pose avec acuité depuis l'abandon des restitutions humiques traditionnelles. Mais les résultats obtenus sont cependant valables pour tous les sols sableux, dont les sols viticoles ne représentent en définitive qu'une fraction.

*Reçu pour publication en juin 1971.*

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement M. G. Lefèvre, Directeur de la Station d'Agronomie d'Amiens, d'avoir bien voulu nous aider de ses conseils lors de la rédaction de ce mémoire.

## SUMMARY

### CHANGES IN THE PROPERTIES OF A SANDY SOIL RESULTING FROM MASSIVE AND REPEATED ADDITIONS OF ORGANIC MATTER FROM VARIOUS SOURCES

A study was conducted, under natural conditions, of the changes undergone by an uncultivated sandy soil, improved during a sevenyear period by annual additions of organic matter, such as wheat straw, buried or spread over the surface, stalks of maize, lucerne hay, rapes of grapes, and mushroom and farmyard manure.

The carbon content of the soil was increased by these applications. With the exception of lucerne hay, the soil was enriched to a greater extent by added organic matters having a lower C/N ratio. The increase in organic matter content was accompanied by qualitative changes in the humic compounds present. The decomposition of wheat straw and maize stalks appears to have been accompanied by fixation of atmospheric nitrogen.

The cation exchange capacity and biological activity of the soils at the end of the tests appeared to depend essentially on their nitrogen or total carbon content. The organic additions caused changes in water retention capacity, pH and fertilizer content. The mineral nitrogen content varied only slightly, probably due to the filtering capacity of the soil tested.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ENTWICKLUNG DER EIGENSCHAFTEN EINES SANDIGEN BODENS UNTER DEM EINFLUSS VON MASSIVEN UND WIEDERHOLTEN ZUFUHREN ORGANISCHER STOFFE VON VERSCHIEDENER HERKUNFT

Unter natürlichen Bedingungen, aber in Abwesenheit jedes Anbaues, wurde die Entwicklung der Eigenschaften eines sandigen Bodens untersucht, der während 7 Jahren alljärlich mit starken Zufuhren organischer Stoffe versorgt wurde : untergepflügtes oder aufgelegtes Weizentr h, Maisstengel, Hed von Luzerne, Traubenschlempen, Pilzmist, Kompost.

Diese Zufuhren steigerten den Kohlenstoffgehalt des Bodens. Mit Ausnahme des Heus von Luzerne, wurde die Anreicherung um so grösser als das C/N — Verhältnis der Dünger schwächer war. Die Steigerung der Rate an organischen Stoffen wurde durch qualitative Veränderungen der humushaltigen Verbindungen begleitet. Im Laufe der Zesrsetzung des Weizenstrohs und der Maisstengel scheint eine Fixation des atmosphärischen Stickstoffes eingetreten zu sein.

Am Ende des Versuches scheinen die Kationе naustauschkapazität und die bilogiscehe Aktivität der Böden wesentlich von ihrem Stickstoff- oder Totalkohlenstoffgehalt abolngignzu sein. Die Zurückhaltekapazität für Wasser, der pH-wert, die Reichhaltigkeit an ferthähali een Elementen wurden ebenfalls durch die Düngerzufuhren verändert. Der Bodenget an mindesiralischen Stickstoff wechselte wenig mit den Behandlungen, wahrscheinlich wegen der filtrierendrn Beschaffenheit des Versuchsbodens.

## РЕЗЮМЕ

Эволюция свойств песчанной почвы под влиянием массовых и повторных внесений органических веществ различного происхождения

Ж. ДЕЛАС.

Эволюция свойств песчанной почвы, получавшей каждый год в течении 7-ми лет массовые количества органических удобрений — пшеничную солому, запаханную или разбросанную по поверхности почвы, кукурузные стебли, сено люцерны, виноградные жмыхи, навоз из шампиньонерок, животный навоз, и.т.д., изучалась в природных условиях, в отсутствии какой-либо культуры.

Внесенные органические удобрения увеличили содержание углерода в почве; за исключением сена люцерны, достигнутое обогащение почвы было настолько крупным, насколько слабым являлось соотношение C/N внесенного органического вещества; увеличение содержания органического вещества в почве сопровождалось количественными изменениями содержания в ней гуминовых соединений. При разложении пшеничной соломы и кукурузных стеблей отмечена была, как-будто, фиксация атмосферного азота.

Емкость обмена катионами и биологическая активность почвы в конце опыта зависели, как кажется, главным образом от общего содержания в ней углерода и азота; внесение органических удобрений изменило также ее полевую влагоемкость, кислотность и содержание питательных веществ в ней. Но содержание минерального азота менялось мало, по всей вероятности благодаря ее сильной водопроницаемости.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Barbier G., Guennelon R., 1951. Variation actuelle de l'humus dans les fermes sans fumier. *C. R. Acad. Agric.*, **37**, 119-123.

Barbier G., Guennelon R., 1951. Sur la loi de variation quantitative de l'humus dans le sol au cours des années. *C. R. Acad. Sci.*, **232**, 550-551.

Courpron C., 1969. Comparaison de la mobilité de différents sels de potasse appliqués à un sol sablo-humifère des Landes de Gascogne. *C. R. Acad. Agric.*, **55**, 891-896.

Delas J., 1967. Utilisation des marcs de raisin comme amendement organique dans les sols de vignoble. *Vignes et Vins*, **164**, 19-27.

Delas J., 1967. Liaisons entre cuivre et matière organique dans un podzol développé sur sable des Landes et accidentellement enrichi en cuivre. *Ann. agron.*, **18**, 17-29.

DELAS J., MOLOT C., 1968. Évolution de la teneur en matière organique des sols du vignoble bordelais. *C. R. Acad. Agric.*, **54**, 929-933.

DROUINEAU G., LEFÈVRE G., 1949. Première contribution à l'étude de l'azote minéralisable dans les sols. *Ann. agron.*, **19**, 518-536.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clay and organic compounds in soils. *Soils and Fert.*, **28**, 415-426.

HÉNIN S., DUPUIS M., 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. agron.*, **15**, 17-29.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural*, 332 p., Masson, Paris.

JUSTE C., DELAS J., 1970. Comparaison par une méthode respirométrique des stabilités biologiques d'un humate de calcium et d'un humate de sodium. *C. R. Acad. Sci.*, **270**, 1127-1129.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

MOREL R., RICHER A., MASSON P., 1956. Évolution du taux de matière organique du sol sous le climat parisien. *VI^e Congrès Sci. Sol*, **2**, 805-810.

MULLER J., 1966. Observation sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. II. Action sur le bilan de l'azote total du sol. *Ann. agron.*, **17**, 21-36.

MULLER J., BRUN F., 1970. Interprétation à l'aide d'un modèle mathématique des profils de l'eau et de l'azote minéral en parcelles nues ou couvertes de paille. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **5**, 25-31.

RUSSEL E. J., 1954. *Soil conditions and plant growth*, 635 p., 8^e édit., Longmans, Green and Co, Londres.

STOUT J. D., DUTCH M. E., 1968. Rates of organic matter decomposition measured by Warburg respiratory experiments. *9th International Congress of Soil Sci. Transactions*, vol. III, 203-209.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* : (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherchesentre prises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) : le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve à corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

# annales agronomiques

Bimestriel

1971

Vol. 22. N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

*Ann. agron.*, 1971, **22** (6), 615-654.

# ESSAI DE CARACTÉRISATION DES SABLES EN TANT QUE SQUELETTE MINÉRAL DU SOL

J. CHRÉTIEN
avec la collaboration technique de G. LAVIELLE

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches, I. N. R. A.,*
*21 - Dijon*

## RÉSUMÉ

La technique d'analyse granulométrique par tamisage permet de classer les sables par classes de taille sans tenir compte de leur nature minéralogique ou de leur forme.

Le but de ce travail consiste à caractériser à l'aide de différentes techniques, des populations tamisées entre 100 et 160 μ et comprenant, d'une part, des particules de formes théoriques (billes, plaquettes) et d'autre part, des sables naturels d'origine géologique et de nature minéralogique variées : sables transportés d'origine marine, dunaire ou fluviatile, sables en place issus d'arène granitique, gréseuse ou sur micaschistes. Ces techniques sont l'analyse minéralogique, la morphoscopie et la morphométrie, les comptages statistiques de population, la mesure des surfaces par perméamétrie, la mesure de la porosité.

Il est apparu que la forme des particules élémentaires, dépendant d'ailleurs de leur nature minéralogique, était le critère de base qui conditionnait tous les autres caractères. Nous avons défini cette forme par des indices moyens de sphéricité et d'arrondi.

En fonction de ce critère fondamental de forme, on a pu distinguer, parmi les neuf populations de sables étudiées, cinq groupes de comportement :

— des sables de formes arrondies issus de matériaux transportés qui présentent une faible densité de population, une faible surface spécifique et une faible porosité ;

— des sables de formes légèrement anguleuses issus d'arène gréseuse sans micas. Ils ont des caractéristiques moyennes ;

— des sables d'arène sur matériaux primaires avec un certain pourcentage de micas qui ont une densité de population, une surface spécifique et une porosité élevées ;

— des sables issus de micaschistes avec une forte proportion de micas. Leur comportement est très particulier avec des caractéristiques très élevées ;

— des particules artificielles très anguleuses avec des caractéristiques moyennes ;

Dans un prochain mémoire, nous étudierons l'incidence de la forme des particules sur les propriétés physiques de sols expérimentaux reconstitués à partir de ces populations de sables.

## A. — INTRODUCTION

On considérait jusqu'alors les sables, sur le plan agronomique, comme un squelette inerte assurant essentiellement une bonne porosité aux sols qui en contiennent un certain pourcentage, les classant sommairement en sables fins (50-200 μ) et sables

grossiers (200-2 000 μ) sans tenir compte de leur nature minéralogique ou de leur forme. La littérature les concernant est extrêmement réduite.

Depuis peu, cependant, et à la faveur de certaines observations de terrain, on s'aperçoit que des discordances se manifestent entre les résultats de l'analyse granulométrique concernant les sables et les propriétés des sols sableux en place.

On a par exemple constaté que, à granulométrie identique, un sol schisteux paraît beaucoup plus lourd qu'un sol granitique.

De même, CHAUVEL et MONNIER (1967) ont montré que deux sols tropicaux, dénommés d'après leur couleur, sol beige et sol rouge, présentant de profondes ressemblances quant à la granulométrie des éléments quartzeux, sont extrêmement différents du point de vue de leur morphologie structurale. Ils ont expliqué cette anomalie en mettant en évidence la présence, dans le cas du sol rouge, de petits agrégats complexes, appelés « pseudo-particules » formés de grains de quartz originel cimentés par des oxydes de fer et susceptibles d'être disloqués lors du traitement dispersant (CHAUVEL et PÉDRO, 1967).

Ceci nous a conduit, dans le cadre d'un programme plus général axé sur l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol, à entreprendre une série de manipulations pour tenter de mettre en évidence les relations pouvant exister entre l'origine, la nature et la forme des sables d'une part, et les propriétés physiques des sols d'autre part.

Ce travail comporte une première partie qui fait l'objet de la présente publication et qui a pour but d'inventorier et de caractériser un certain nombre de types de sables naturels et de particules de formes géométriques simples.

Pour cela, il était nécessaire de choisir un même critère inital de sélection pour les différents types de sables. Ce fut, tout naturellement, celui que l'on utilise dans la technique de l'analyse granulométrique, à savoir le tamisage sur tamis à mailles carrées. Or, cette sélection de la particule se fait, non pas à partir de son volume, mais de sa section minimale susceptible de traverser la maille. C'est une sélection à deux dimensions alors que les particules sont tridimensionnelles, d'où l'imperfection évidente de la méthode.

Pour appréhender la notion de forme, nous serons amené dans un premier temps, à étudier celle-ci au niveau de la particule élémentaire, en adoptant pour cela les méthodes préconisées par certains géologues (CAILLEUX, TRICART, ROUSSEAU...).

Puis, comme nous utiliserons essentiellement des sables naturels à population hétérogène, il nous faudra caractériser globalement ces populations en fonction de la notion de forme.

Enfin, nous étudierons l'incidence des variations de forme des particules sur des caractéristiques globales, telles que la densité de population, la surface spécifique du squelette et la porosité des assemblages car ces caractéristiques que nous définirons plus loin sont susceptibles d'intéresser l'agronome qui considère avant tout les sables comme un squelette minéral, dont l'association avec le plasma, constitué de matériaux minéraux et organiques de dimension colloïdale, contribue à former le matériau sol.

## B. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1. — *Les sables*

a) *Choix des types de sables.*

Le but poursuivi par ce travail est d'étudier comparativement des types de sables aussi différents que possible par leur origine géologique, leur nature minéralogique, leur forme et l'aspect de leur surface ; la forme étant pour un squlette, nous semble-t-il, un facteur essentiel.

C'est pourquoi nous avons pensé aborder le problème en utilisant d'abord des formes théoriques susceptibles de conduire à des empilements très différents (sphère, formes plates, formes très anguleuses) et vers lesquelles pourraient tendre les sables naturels.

*Sables artificiels* (Planche I).

Les matériaux choisis ont été :
— des microbilles en verre calibrées,
— des plaquettes de verre que nous avons obtenues en concassant des verres extra-minces d'épaisseur comprise entre 50 et 80 μ,
— des quartz concassés dits quartz de Bordeaux de formes très anguleuses.

*Sables naturels* (Planches II et III.).

Six types de sables très différents ont été étudiés :
— des sables transportés :
d'origine marine et dunaire : sables de Fontainebleau,
d'origine fluviatile : sables des terrasses de la Saône (sous-sol à Auxonne) ,
— des sables en place :
sable d'arène grèseuse : issu du trias de la forêt de la Serre,
sable d'arène granitique : sous-sol de la Pierre-qui-Vire dans le massif du Morvan,
sable d'arène sur migmatites du Moyen-Vivarais,
sable d'arène sur micaschistes du Massif des Maures (Cavalaire).

b) *Préparation des sables.*

Les sables naturels ont subi un premier tamisage à 200 μ pour séparer sables fins et sables grossiers, puis un lavage à l'eau distillée avec décantations successives, une attaque à l'eau oxygénée afin d'éliminer les traces de matière organique, et avec HCl dilué pour dissoudre d'éventuels dépôts d'oxydes de fer.

Afin d'étudier des lots aussi homogènes que possible, nous avons volontairement limité l'échelle des tailles des sables en prenant à l'intérieur des sables fins la fraction 100-160 μ obtenue par tamisage. D'autres raisons que nous évoquerons par la suite ont d'ailleurs guidé ce choix.

### 2. — *Les techniques utilisées*

a) *Analyse minéralogique sommaire* (méthode de TAMM et LEENHER modifiée par DUCHAUFOUR, 1956).

Cette technique essentiellement densimétrique pratiquée sur les fractions sableuses non calcaires permet en principe de séparer les minéraux en 6 groupes.

On sépare d'abord les micas comme suit : le sable est répandu en faible quantité sur une plaque inclinée très polie ; de petits coups secs font rouler les autres minéraux vers le bas, tandis que les micas restent sur place. Puis on immerge successivement les sables dans des liqueurs de densité 2,68 (bromoforme + benzène) et 2,9 (bromoforme) pour obtenir 3 fractions ainsi composées :
— fraction légère (inf. à 2,68) : quartz, feldspaths K et Na ;
— fraction moyenne (entre 2,68 et 2,9) : feldspaths plagioclases Ca ;
— fraction lourde (sup. à 2,9) : minéraux lourds et oxydes de fer.

La détermination a été réalisée sur un échantillon de 5 g. Un examen des différentes fractions à l'aide d'un microscope stéréoscopique nous a permis de préciser leur nature minéralogique.

b) *Morphoscopie et morphométrie.*

La morphoscopie est l'observation qualitative des grains de sable. Elle permet d'étudier leur forme et leur aspect. Nous avons, pour cela, utilisé la technique préconisée par CAILLEUX et TRICART (1963) : observation à l'aide d'un microscope stéréoscopique de grossissement allant jusqu'à 100, de grains de sable à sec, isolés sur fond noir.

Étant donné la difficulté, dans certains cas, de classer les grains en types par simple observation qualitative, les géologues ont tenté de préciser leurs formes par des mesures ; c'est l'objet de la morphométrie. De nombreux indices d'usure ont été proposés par différents auteurs. Parmi les plus usités, nous citerons ceux de WENTWORTH, WADELL, KRUMBEIN et CAILLEUX (CAILLEUX et TRICART, 1963). Certains, comme l'indice d'émoussé de CAILLEUX, nécessitent des mesures de rayons de courbure et de rayons de cercle inscrit sur des grains de sable à l'aide d'un micromètre-cible, qui sont difficiles à réaliser sur des sables d'une taille de 100 $\mu$ environ.

Nous avons préféré, dans le cadre de cette caractérisation, utiliser la méthode morphométrique de KRUMBEIN et SLOSS qui permet de chiffrer les valeurs d'arrondi et de sphéricité (VATAN, 1967).

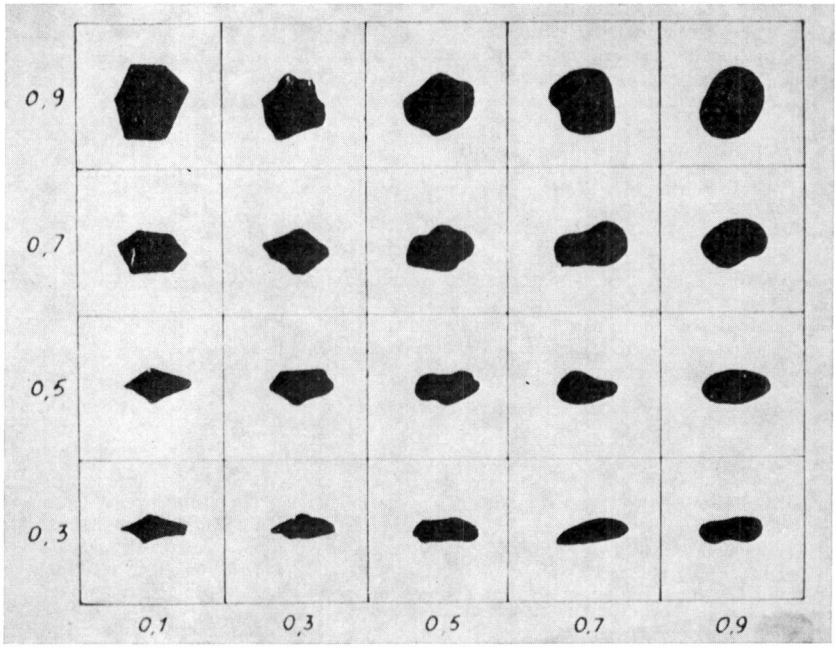
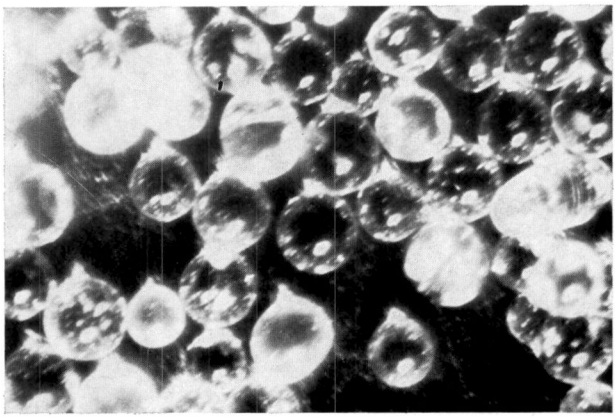



FIG. 1. — *Charte visuelle pour l'estimation de l'arrondi et de la sphéricité des grains de sable*

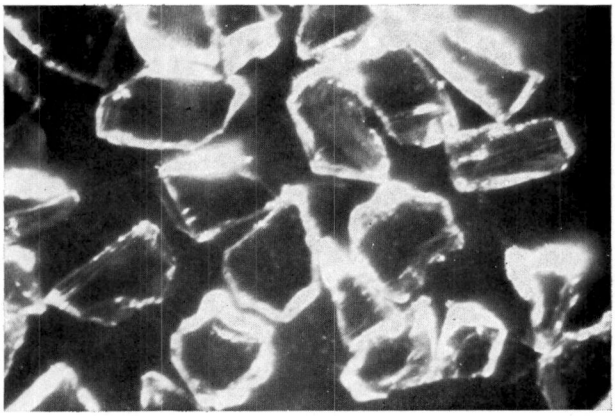
L'indice d'arrondi de KRUMBEIN est obtenu en comparant le grain à étudier avec une charte graduée (fig. 1) qui se compose de dessins de grains présentant les indices de WADELL ainsi définis :

$$i_w = \frac{\text{moyenne des rayons de courbure des convexités du grain}}{\text{rayon du plus grand cercle inscrit dans le grain}}.$$

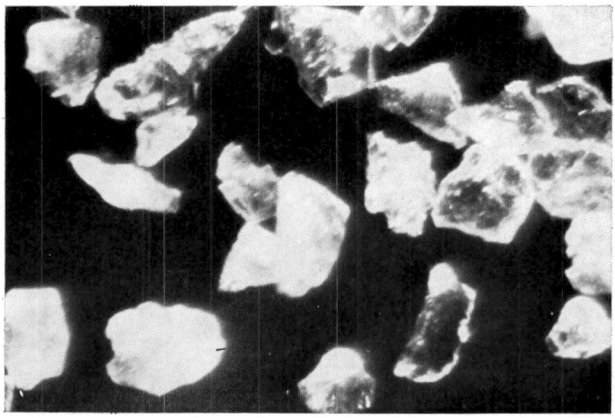
L'indice de sphéricité du grain est le rapport des images (projection sur un plan) de la largeur sur la longueur. A l'aide de cette charte visuelle d'usage très pratique, nous avons pu caractériser chacune des populations de sables en opérant des comptages statistiques de formes sur environ 100 grains.



Billes

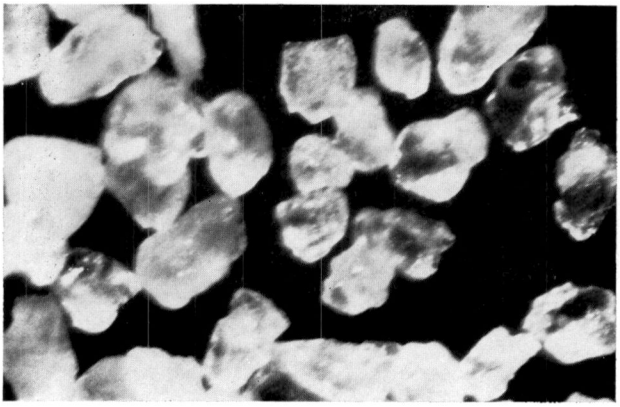


Plaquettes

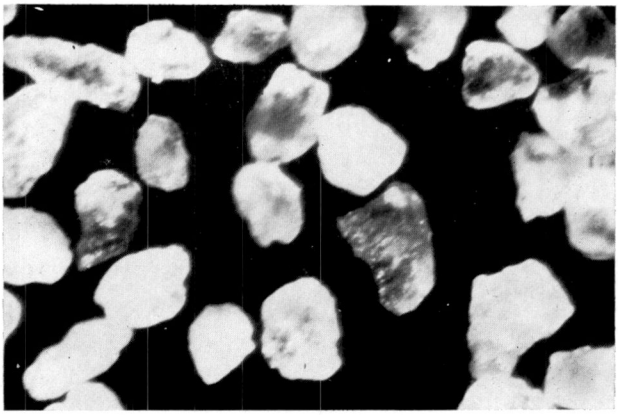


Bordeaux

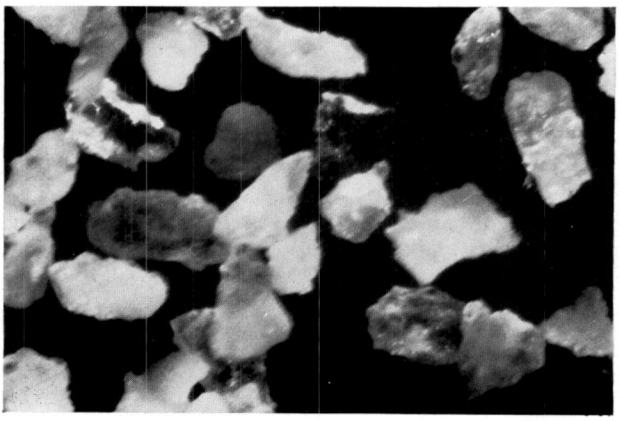
J. CHRÉTIEN



Fontainebleau

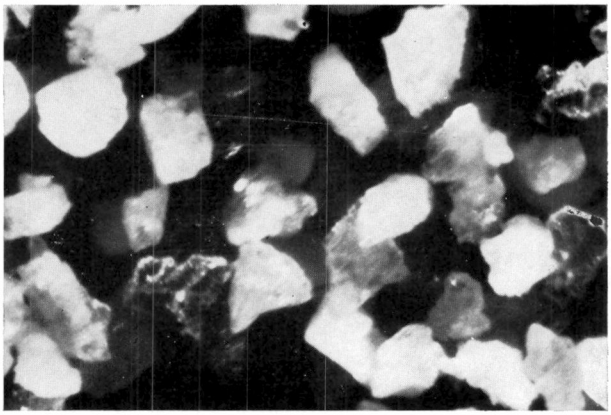


Saône

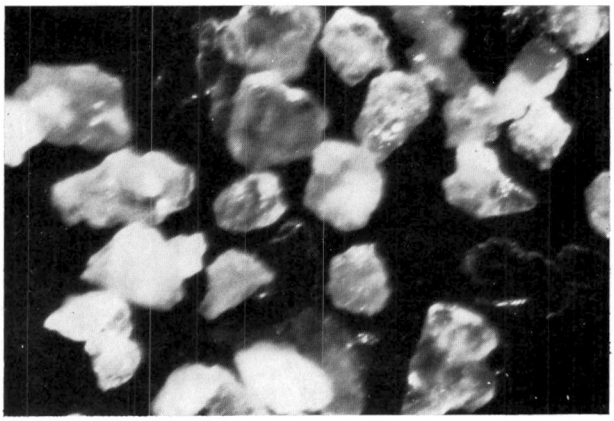


Serre

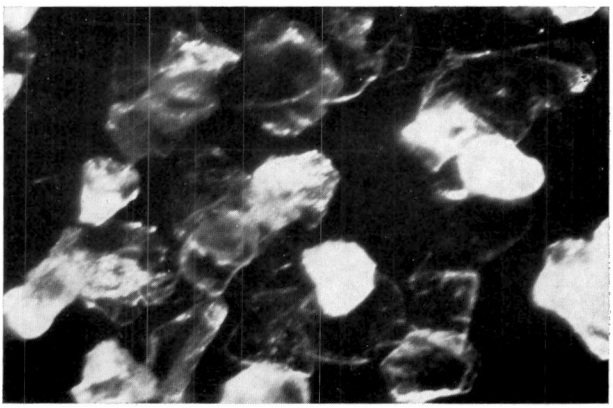
J. CHRÉTIEN



Morvan



Vivarais



Maures

J. CHRÉTIEN

c) *Comptage statistique des grains.*

Le problème du comptage statistique des grains est le même qu'il s'agisse de connaître le pourcentage de grains d'une forme donnée, de nature minéralogique différente ou d'évaluer une densité de population par unité de poids.

Dans tous les cas, nous avons exécuté des comptages à l'aide d'un microscope stéréoscopique équipé d'un réticule avec quadrillage 100 × 1 mm².

d) *Perméamétrie. Mesure des surfaces spécifiques.*

1. *Principe.*

La détermination des surfaces spécifiques par perméamétrie est basée sur la résistance rencontrée par un fluide s'écoulant à travers une colonne remplie du solide étudié. Il s'agit donc d'un phénomène dynamique faisant intervenir la perméabilité d'un solide.

Lorsqu'un fluide de viscosité $\eta$ s'écoule à travers un solide réparti sur une colonne de hauteur L et de section A, la pression du fluide subit entre les deux extrémités de la colonne, une diminution $\Delta\rho$ et le débit $\varphi$ (exprimé en volume de fluide par unité de temps) est donné par la relation :

$$\varphi = \frac{KA}{\eta}\frac{\Delta\rho}{L}$$

K étant le coefficient de perméabilité du milieu.

En première approximation, on peut convenir de représenter le solide par une série de capillaires par lesquels s'écoule le fluide. Leur rayon moyen s'exprime ainsi après calcul :

$$r_m = k\,\frac{\text{vol. des capillaires}}{\text{surface de la paroi des capillaires}}$$

L'application de la loi de Poiseuille à cet ensemble de capillaires conduit à l'équation de Kozeny donnant, dans le cas d'un écoulement visqueux, le débit d'un fluide à travers un lit de particules :

$$\varphi = A\,\frac{1}{k\eta}\cdot\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}\cdot\frac{1}{S_E{}^2\rho^2}\cdot\frac{\Delta\rho}{L}$$

avec exprimés en unités CGS :

$\varepsilon$ : porosité accessible au fluide
$\rho$ (g/cm³) : masse volumique réelle du solide
$\Delta\rho$ (dyne/cm²) : perte de charge à travers la colonne
L (cm) : hauteur de la colonne
A (cm²) : section de la colonne
$S_E$ (cm²) : surface externe spécifique des particules
$\eta$ (poises) : viscosité du fluide
$k$ : constante tenant compte de la forme et de la tortuosité des capillaires ; elle peut être évaluée expérimentalement à partir de solides connus, ainsi :
$k = 5{,}0$ pour des particules sphériques
$k = 3{,}1$ pour des fibres de verre parallèles au sens de l'écoulement
$k = 6{,}0$ pour les mêmes fibres de verre perpendiculaires au sens de l'écoulement

à condition d'exprimer $\Delta\rho$ en CGS.

On peut donc évaluer par perméamétrie la surface externe d'un solide divisé :

$$S_E{}^2 = \frac{1}{kK\eta}\cdot\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2\rho^2}$$

avec

$$K = \frac{\varphi L}{AH} \text{ si } H = \Delta\rho \text{ en CGS.}$$

On peut en déduire également le diamètre moyen équivalent des particules supposées sphériques :

$$d_m = \frac{6}{\rho S_E}.$$

Cette méthode est simple et facile à mettre en œuvre. Elle convient très bien pour de grosses particules pour lesquelles la surface externe spécifique est inférieure à 0,1 $m^2/g$ soit un diamètre moyen supérieur à 10 $\mu$, ce qui est notre cas. Le fluide utilisé ici est l'eau.

2. *Technique.*

La technique utilisée (FIÈS, 1970) est sensiblement la même que celle du test de perméabilité de HÉNIN (1960). Toutefois, la toile filtrante employée doit être une toile de bluterie à maille très fine et insensible au gonflement (la toile de nylon très sensible au gonflement ne convient absolument pas). Les tubes de percolation sont remplis avec 100 g de sable mais par prises d'essai successives de 10 g pesées indépendamment, afin d'obtenir une meilleure régularité de dépôt (BENAVIDEZ, 1971). La charge d'eau doit être maintenue constante.

Afin de régulariser l'écoulement et pour éviter les variations de tension superficielle du goutte à goutte, un petit tube à essai retourné et soudé au becher est maintenu au contact de la toile filtrante.

On mesure le volume d'eau écoulée toutes les 10 minutes, par pesée, pendant 1 heure.

e) *Mesure de la porosité.*

Elle s'exprime par la formule :

$$P\ p.\ 100 = \frac{D\ réelle - D\ apparente}{D\ réelle} \times 100$$

La densité réelle des sables a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre de Regnault de 25 $cm^3$ en utilisant des échantillons de 3 g environ et après dégazage d'1/2 heure sous cloche à vide.

Pour obtenir la densité apparente, nous avons mis au point une technique simple et rapide (compte-tenu des caractéristiques des sables, matériau meuble, maniable et uniforme) qui semble, à notre avis, avoir donné des résultats suffisamment précis dans le cadre de ces essais de caractérisation.

Le sable est introduit dans un petit becher tronconique en matière plastique dont nous avons mesuré le volume (23,60 $cm^3$) par pesée après remplissage avec de l'alcool éthylique (en raison de l'absence quasi totale de ménisque). On pèse le becher rempli de sable et on calcule la densité apparente.

Deux porosités ont été ainsi mesurées sur les sables :

— une porosité « sans tassement », obtenue par remplissage du becher avec précaution et rasage de la surface à l'aide d'une spatule, puis pesée. L'opération a été répétée 4 fois ;

— une porosité « avec tassement » obtenue par vibration sur un appareil à tamiser. Le becher étant rempli de sable, recouvert d'un couvercle, soumis à une vibration de faible intensité pendant une minute, puis rempli à nouveau... ceci 5 fois de suite jusqu'aux limites possibles du remplissage (7 fois dans le cas des sables des Maures). Des doubles ont toujours été exécutés.

## C. — RÉSULTATS : CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES

### 1. — *Caractérisation minéralogique*

La méthode d'analyse minéralogique de DUCHAUFOUR a donné les résultats suivants consignés dans le tableau 1. Il en ressort que :

— la fraction lourde, celle des minéraux lourds, extrêmement intéressante du point de vue qualitatif pour le géologue, revêt pour nous du point de vue de son rôle quantitatif en tant que squelette minéral, une importance très minime. Elle est en effet dans 4 cas, inférieure à 0,5 p. 100 et atteint un chiffre anormalement élevé, 6,6 p. 100 dans le cas des « Maures » ;

— la fraction moyenne composée de minéraux assez disparates est, elle aussi,

TABLEAU I

*Composition minéralogique des sables* (100-160 μ) (Méthode DUCHAUFOUR et identification à la loupe binoculaire)

| Populations | Fraction « micas » | | Fraction légère $d < 2,68$ | | Fraction moyenne $2,68 < d < 2,9$ | | Fraction lourde $d > 2,9$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | Minéraux | % | Minéraux | % | Minéraux | % | Minéraux |
| Fontainebleau | 0 | | 99,6 | quartz | ≠ 0 | | 0,4 | tourmaline + + + + monazite +<br>disthène + + + zircon +<br>épidote + + hornblende verte +<br>andalousite + |
| Saône | 0 | | 97,8 | quartz<br>feldspaths K<br>quelques<br>plagioclases | 0,4 | quelques micas<br>plagioclases | 1,8 | hornblende verte + + + augite +<br>épidote + + zircon +<br>tourmaline + + apatite + |
| Serre | 0 | | 99,4 | quartz<br>quelques<br>feldspaths | 0,4 | plagioclases<br>quelques<br>feldspaths K<br>quelques chlorites | 0,2 | tourmaline + + + hornblende verte + +<br>zircon + + anatase +<br>épidote + + sillimanite + |
| Morvan | 11 | biotite<br>muscovite | 84,4 | quartz<br>feldspaths<br>plagioclases | 4,2 | | 0,4 | apatite<br>minéraux opaques |
| Vivarais | 19,6 | biotite<br>muscovite | 79,2 | quartz<br>feldspaths<br>quelques<br>plagioclases | 0,8 | plagioclases<br>quartz<br>concrétions Fe | 0,4 | biotite + + + + épidote +<br>grenat + + + rutile +<br>sillimanite + + + hornblende verte +<br>tourmaline + + |
| Maures | 71,6 | biotite<br>muscovite | 21,2 | quartz<br>feldspaths<br>micas | 0,6 | feldspaths<br>micas | 6,6 | tourmaline<br>zircon |

*Rem.* : 1. En dépit de nombreuses répétitions conduisant à une épuration progressive, la séparation intégrale des micas s'avère impossible par cette méthode.

2. Les plaquettes de verre testées par la méthode de séparation des micas ont donné : plates : 74,0 p. 100 ; non plates : 26,0 p. 100.

pratiquement négligeable du point de vue quantitatif. Nous n'en tiendrons pas compte.

Compte tenu des 2 autres fractions, fraction légère et fraction « micas », 3 types de sables apparaissent donc (des comptages effectués viennent nous préciser leur contenu, voir tableau 2) :

— des sables sans micas contenant uniquement du quartz (Fontainebleau) ou une très forte proportion de quartz avec un peu de feldspaths (Saône et Serre) ;

— des sables avec une proportion non négligeable de micas, environ 10 p. 100 (Morvan) et 20 p. 100 (Vivarais), et une forte quantité de quartz et feldspaths ;

TABLEAU 2

*Comptage de grains dans la fraction « micas » et la fraction légère*

| | Fraction « micas » | | | | | | Fraction légère | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Biotite | | Muscovite | | autres minéraux non micacés | | Quartz | | Feldspaths | |
| | nombre | % | nombre | % | nombre | % | nombre | % | nombre | % |
| Fontainebleau | | | | | | | | 100 | | 0 |
| Saône | | | | | | | 266 | 89 | 32 | 11 |
| Serre | | | | | | | 112 | 96 | 4 | 4 |
| Morvan | 84 | 21 | 45 | 11 | 269 | 68 | 138 | 79 | 37 | 21 |
| Vivarais | 163 | 73 | 35 | 16 | 24 | 11 | 207 | 78 | 57 | 22 |
| Maures | 52 | 32 | 111 | 68 | 0 | 0 | 168 | 78 | 49 | 22 |

— un sable essentiellement formé de micas (plus de 70 p. 100) avec environ 20 p. 100 de quartz et feldspaths (Maures).

*Remarques.*

1° Les plaquettes testées de la même façon ont donné 74 p. 100 de fraction « micas » c'est-à-dire assimilable à des formes plates.

2° L'examen de la fraction « micas » de l'échantillon « Morvan » nous montre les limites de cette méthode. Ici, en effet, seulement 32 p. 100 soit 1/3 de la fraction « micas » est constitué par des micas au sens minéralogique du terme, le reste, les 2/3, étant en réalité d'autres minéraux (quartz, feldspaths) qui ont des formes assez aplaties. Ce classement présente d'ailleurs, dans le cadre de cette étude sur le squelette, un intérêt certain.

### 2. — *Formes et aspects des grains*

L'étude morphoscopique a été réalisée sur les grains de quartz, les feldspaths ayant des formes d'usure à peu près semblables et acquises presque aussi vite que pour ces derniers. Il existe 3 types fondamentaux de quartz bien connus (CAILLEUX, 1963) :

— les émoussés-luisants : contour général à angles émoussés ou même arrondis, surface brillante. Grains usés dans l'eau, à la suite d'un long frottement avec roulement ;

— les ronds-mats : contour général émoussé ou rond, plus rond en moyenne que dans le cas précédent — surface entièrement dépolie — longue usure par chocs dans l'air sous l'effet du vent ;

— les non-usés : contour anguleux — les faces sont des cassures qui peuvent être lisses ou ternes.

L'étude, en particulier à l'aide de courbes morphoscopiques, de ces 3 types fondamentaux et de leurs variantes et transitions permet de déterminer l'action des agents naturels dans leur façonnement et leur histoire géologique. Mais tel n'est pas le but de ce travail essentiellement destiné à préciser les formes des grains, éléments de squelette pouvant former des types d'assemblages différents.

Nous avons rassemblé nos observations dans le tableau 3.

TABLEAU 3

*Caractères morphoscopiques des quartz*
(fraction $d < 2{,}68$)

| Populations | Formes | Types | Origines |
|---|---|---|---|
| Fontainebleau | Forte majorité à angles très arrondis<br>Quelques-uns non arrondis à angles émoussés | Émoussés luisants | Sables marins et dunaires |
| Saône | Majorité à angles arrondis<br>Nombreux assez anguleux | Émoussés luisants et peu usés | Sables fluviatiles moins usés que les sables marins |
| Serre | Majorité à angles assez émoussés<br>Quelques anguleux | Émoussés luisants et non usés | Arène gréseuse formée de quartz peut-être préalablement usés |
| Morvan | Forte majorité très anguleux | Non usés | Arène granitique en place |
| Vivarais | A angles assez émoussés<br>Assez anguleux | Émoussés luisants et non usés | Arène sur migmatites |

L'utilisation de la charte visuelle de KRUMBEIN et SLOSS nous a permis de réaliser un comptage statistique de grains caractérisés par des valeurs d'indices de sphéricité et d'arrondi. Les résultats de ce comptage sont présentés sous forme de courbe cumulative dans les figures 2 et 3. On peut en déduire les résultats suivants :

*Indice de sphéricité.*

Dans les 5 populations de sables, la plupart des grains (80 p. 100 environ) se situe dans des valeurs moyennes d'indices 0,5 et 0,7. Ils ne sont pas très aplatis ni sub-équidimensionnels. On en trouve toujours moins de 20 p. 100 à l'indice 0,3

et moins de 10 p. 100 à l'indice 0,9, ce dernier chiffre confirmant une remarque de CAILLEUX, selon laquelle la sphère n'est pas la forme vers laquelle tendent les grains usés, sauf dans des cas exceptionnels.

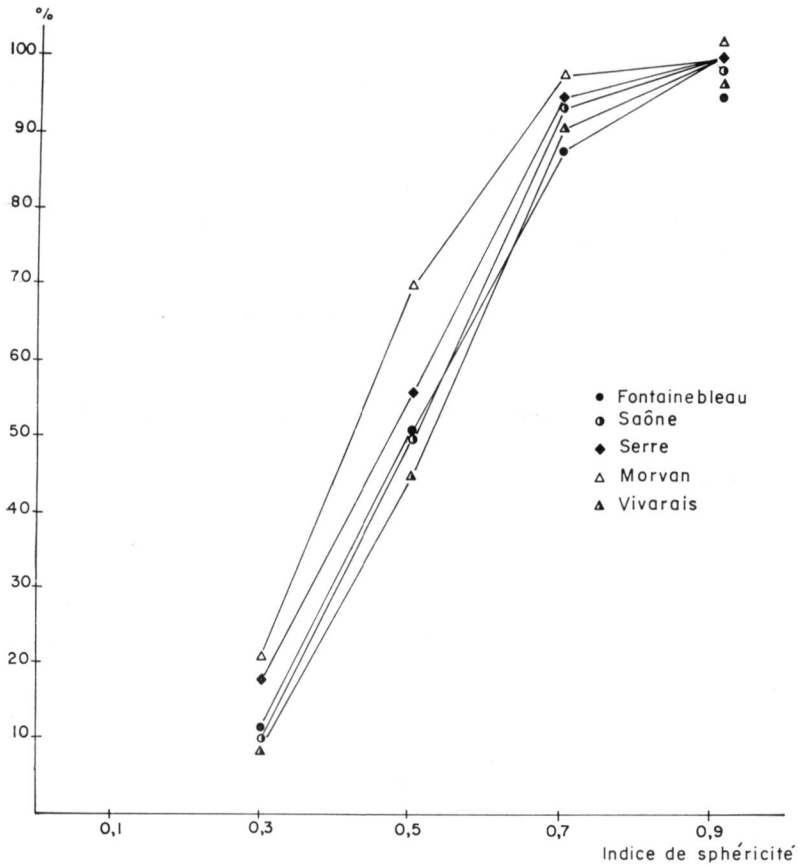



FIG. 2. — *Courbes cumulatives de l'indice de sphéricité* $i_s$

Les courbes Fontainebleau, Saône, Serre et Vivarais sont assez semblables. Seule, la courbe Morvan présente des formes aplaties, 70 p. 100 ont un indice inférieur ou égal à 0,5.

*Indice d'arrondi.*

Trois populations Saône, Serre et Vivarais sont très comparables et très homogènes avec environ 80 p. 100 des grains d'indice 0,3.

Deux populations se distinguent nettement :

— Fontainebleau qui présente une majorité de grains à l'indice 0,5 donc nettement plus arrondis;

— Morvan qui possède une forte proportion de grains (plus de 40 p. 100) à l'indice 0,1, c'est-à-dire très anguleux.

Les 2 courbes sont d'ailleurs sensiblement égales et peuvent se déduire l'une de l'autre par une translation de 0,2 unités.

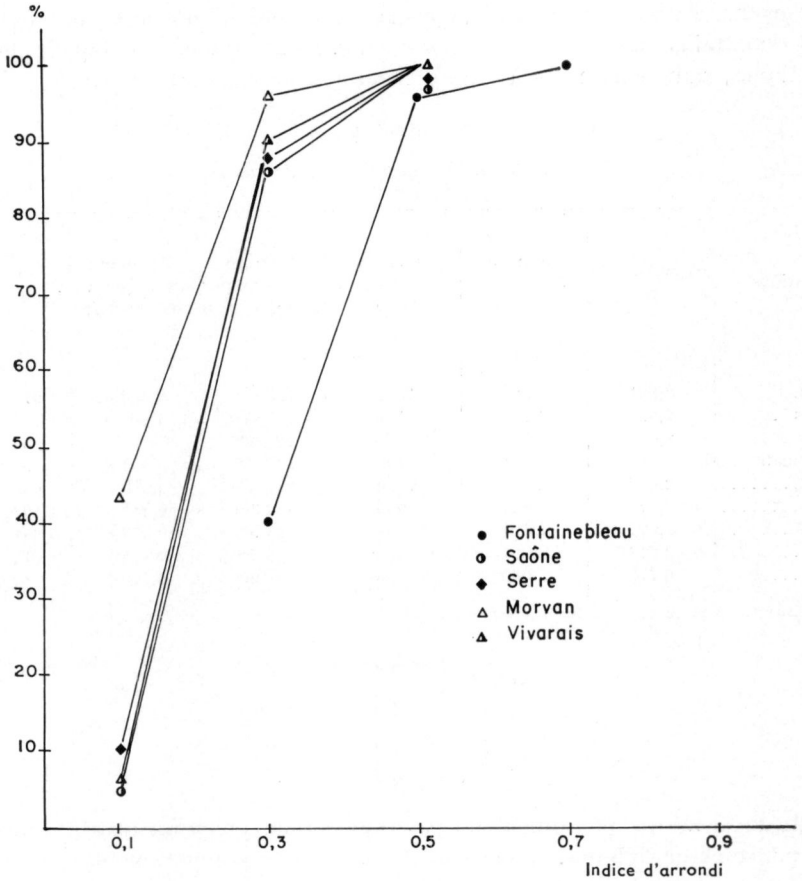



FIG. 3. — *Courbes cumulatives de l'indice d'arrondi* $i_a$

En conclusion de cette étude morphométrique, il apparaît que :

— Saône, Serre et Vivarais, présentent des populations peu différentes avec une majorité de formes peu aplaties et à angles légèrement arrondis, non tenu compte bien sûr, des 20 p. 100 de micas dans le cas de Vivarais,

— Fontainebleau, des grains de quartz à angles arrondis,

— Morvan, des formes anguleuses et moins régulières.

### 3. — *Caractéristiques des populations*

Les résultats des comptages statistiques de grains sont mentionnés au tableau 4 qui appelle quelques remarques préliminaires :

— La densité réelle mesurée au pycnomètre a fourni des doubles dont l'écart moyen est 0,014 et l'écart maximum 0,023 pour « Bordeaux », soit une erreur moyenne de 0,53 p. 100 en prenant $d_R$ moyenne = 2,65. C'est donc une mesure précise.

— Le comptage des grains étant une manipulation longue, et d'autre part, le poids de l'échantillon de grains comptés devant être relativement élevé pour

limiter l'erreur relative due à la pesée, nous avons adopté un moyen terme, comptage de 2 à 3 000 grains pour un poids de 5 à 10 mg. Nous n'avons pas fait de doubles systématiques, sauf dans 2 cas à titre d'exemple. Les résultats en sont :

TABLEAU 4

*Caractéristiques des populations de sables*

| Populations | Densité réelle $d_R$ | Nombre de grains comptés | Poids de l'échantillon (en mg) | Nombre de grains par gramme = $n$ | Volume spécifique $V_s$ (en $cm^3/g$) | Volume moyen élémentaire $v_e$ (en $\mu^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Billes ..... | 2,631 | 2 624 | 13,20 | 198 800 | 0,380 0 | $1\,911 \times 10^3$ |
| Plaquettes ..... | 2,482 | 2 726 | 11,50 | 237 000 | 0,402 9 | $1\,700 \times 10^3$ |
| Bordeaux ..... | 2,674 | 2 175 | 5,55 | 391 900 | 0,374 0 | $954 \times 10^3$ |
| Fontainebleau ... | 2,647 | 2 551 | 12,80 | 199 300 | 0,377 8 | $1\,895 \times 10^3$ |
| Saône ..... | 2,637 | 2 640 | 11,40 | 231 500 | 0,379 2 | $1\,638 \times 10^3$ |
| Serre ..... | 2,614 | 3 034 | 9,50 | 319 300 | 0,382 5 | $1\,198 \times 10^3$ |
| Morvan ..... | 2,647 | 3 921 | 9,25 | 423 900 | 0,377 8 | $891 \times 10^3$ |
| Vivarais ..... | 2,673 | 3 081 | 8,35 | 368 900 | 0,374 1 | $1\,014 \times 10^3$ |
| Maures ..... | 2,776 | 5 066 | 6,80 | 745 000 | 0,360 2 | $483 \times 10^3$ |

$$\text{Billes} \begin{cases} 198\,800 \text{ grains/g} \\ 225\,900 \quad — \end{cases}$$

$$\text{Morvan} \begin{cases} 416\,700 \text{ grains/g} \\ 423\,900 \quad — \end{cases}$$

Cette méthode ne présente donc pas une grande précision absolue mais elle permet pourtant de différencier facilement les diverses populations de sables.

— Le volume spécifique $V_s$ exprimé en $cm^3$ par gramme représente le volume réel occupé par 1 g de chacun des types de sables.

— Enfin, le volume moyen élémentaire $v_e$ exprimé en $\mu^3$, est le volume réel moyen du grain dans chacun des types de sables considérés, obtenu en divisant le volume spécifique $V_s$ par le nombre de grains par gramme. Soit :

$$v_e = \frac{V_s}{n}.$$

*Résultats.*

*Densité réelle :* pour la plupart des sables, les densités sont peu différentes et voisines de celle du quartz 2,65. Seules se différencient nettement les plaquettes constituées d'un verre de faible densité et « Maures » dont les sables micacés renferment une certaine quantité de fer.

*Densité de population.*

On peut distinguer trois groupes de population :

— des sables à faible densité de population, voisine de 200 à 230 000 grains par gramme. Ce sont dans un ordre croissant : Billes, Fontainebleau, Saône, Plaquettes ;

— des sables à densité de population moyenne et forte, comprise entre 320 000 et 420 000 grains par gramme. Ce sont : Serre, Vivarais, Bordeaux, Morvan;

— un sable à très forte densité de population presque 5 fois plus élevée que pour les billes : Maures avec 745 000 grains par gramme.

*Volume moyen élémentaire.*

Les densités des différents sables étant proches les unes des autres, on retrouve ici environ le même classement que pour les densités de population, les faibles densités de population correspondant à des volumes moyens élémentaires élevés et inversement.

On a donc :

— des sables à fort volume moyen élémentaire compris entre 1 600 et 2 000 $\times$ $10^3$ $\mu^3$ : Billes, Fontainebleau, Plaquettes, Saône;

— des sables à $v_e$ moyen compris entre 900 et 1 200 $\times$ $10^3$ $\mu^3$ : Serre, Vivarais, Bordeaux, Morvan ;

— un sable à très faible $v_e$, environ 4 fois plus faible que celui des billes : Maures 483 $\times$ $10^3$ $\mu^3$.

### 4. — *Surfaces spécifiques*

La technique de perméamétrie précédemment décrite nous permet d'obtenir des débits $\varphi$ exprimés en $cm^3$ par heure qui, après application de la formule de Kozeny nous conduisent à des valeurs des surfaces spécifiques des diverses populations de sables exprimées en $cm^2$ par gramme. Les diverses étapes de ce calcul sont résumées au tableau 5. Rappelons l'équation de Kozeny :

$$\varphi = A \frac{1}{k\eta} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{S_E^2 \rho^2} \cdot \frac{\Delta p}{L}$$

que l'on peut exprimer différemment pour le calcul de la surface spécifique d'un solide divisé :

$$S_E{}^2 = \frac{1}{kK\eta} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 \rho^2}$$

avec

$$K = \frac{\varphi L}{AH}.$$

Un certain nombre de constantes figurent dans les conditions expérimentales :

— la section de la colonne A = 7,446 $cm^2$,

— la charge d'eau H = 14,5 cm ou H = 30 cm,

— la viscosité de l'eau $\eta$ qui, pour la température de l'expérience à 20°, est égale à 1,0299,

— le coefficient de forme $k$ que, dans un premier temps, nous avons pris égal à 5 pour tous les types de sables.

Les facteurs variables sont représentés sur le tableau 5 :

— la hauteur de l'échantillon L,

— la masse volumique réelle du solide $\rho$ ou densité réelle (voir tabl. 4),

— la porosité $\varepsilon = 1 - \frac{m}{\rho A L}$

$m$ étant le poids de sable utilisé, ici 100 g.

TABLEAU 5

*Surfaces spécifiques des sables obtenues par perméamétrie*

| Populations | Débit $\varphi$ (en $cm^3$/heure) | Hauteur de l'échantillon (L en cm) | Charge (H en cm) | Vitesse de filtration (K en cm/s) | Porosité ($\varepsilon$) | $S^2$ | Surface spécifique (S en $cm^2/g$) | Diamètre équivalent ($d$ en $\mu$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Billes | 766,61 | 7,7 | 14,5 | $1{,}518 \times 10^{-2}$ | 0,337 1 | 15,788 | 125,6 | 181,6 |
| Billes | 747,87 | 7,7 | 14,5 | $1{,}481 \times 10^{-2}$ | 0,337 1 | 16,183 | 127,2 | 179,3 |
| Plaquettes | 673,35 | 7,1 | 14,5 | $1{,}229 \times 10^{-2}$ | 0,390 4 | 40,250 | 200,6 | 120,5 |
| Plaquettes | 734,82 | 7,3 | 14,5 | $1{,}386 \times 10^{-2}$ | 0,351 5 | 42,805 | 206,8 | 116,9 |
| Fontainebleau | 539,63 | 8,3 | 14,5 | $1{,}152 \times 10^{-2}$ | 0,388 7 | 37,048 | 192,4 | 117,8 |
| Fontainebleau | 531,32 | 8,4 | 14,5 | $1{,}153 \times 10^{-2}$ | 0,396 0 | 40,169 | 200,4 | 113,1 |
| Saône | 487,36 | 8,6 | 14,5 | $1{,}078 \times 10^{-2}$ | 0,407 8 | 49,079 | 221,5 | 102,7 |
| Saône | 550,59 | 8,5 | 14,5 | $1{,}099 \times 10^{-2}$ | 0,400 8 | 44,670 | 211,3 | 107,7 |
| Serre | 488,66 | 10,3 | 14,5 | $1{,}294 \times 10^{-2}$ | 0,501 2 | 108,931 | 330,0 | 69,5 |
| Serre | 475,72 | 10,1 | 14,5 | $1{,}236 \times 10^{-2}$ | 0,491 3 | 103,232 | 321,3 | 71,4 |
| Bordeaux | 455,59 | 8,9 | 14,5 | $1{,}043 \times 10^{-2}$ | 0,435 7 | 67,925 | 260,6 | 86,1 |
| Bordeaux | 476,71 | 9,0 | 14,5 | $1{,}103 \times 10^{-2}$ | 0,442 0 | 66,876 | 258,6 | 86,8 |
| Morvan | 363,78 | 11,3 | 14,5 | $1{,}057 \times 10^{-2}$ | 0,551 1 | 213,558 | 462,1 | 49,0 |
| Morvan | 378,35 | 11,4 | 14,5 | $1{,}109 \times 10^{-2}$ | 0,555 0 | 211,599 | 460,0 | 49,2 |
| Vivarais | 429,89 | 7,2 | 14,5 | $0{,}796 \times 10^{-2}$ | 0,511 6 | 187,864 | 433,4 | 51,8 |
| Vivarais | 464,34 | 7,4 | 14,5 | $0{,}888 \times 10^{-2}$ | 0,524 7 | 191,672 | 437,8 | 51,3 |
| Maures | 297,10 | 11,3 | 14,5 | $0{,}863 \times 10^{-2}$ | 0,572 0 | 292,138 | 540,9 | 39,9 |
| Maures | 267,70 | 11,2 | 14,5 | $0{,}771 \times 10^{-2}$ | 0,568 1 | 314,778 | 561,0 | 38,5 |
| Billes | 1 549,86 | 7,8 | 30,0 | $1{,}519 \times 10^{-2}$ | 0,345 6 | 17,414 | 131,9 | 172,9 |
| Billes | 1 597,49 | 7,9 | 30,0 | $1{,}565 \times 10^{-2}$ | 0,347 9 | 17,394 | 131,8 | 173,0 |
| Serre | 1 024,24 | 10,2 | 30,0 | $1{,}309 \times 10^{-2}$ | 0,496 3 | 102,499 | 320,1 | 71,7 |
| Serre | 965,26 | 10,4 | 30,0 | $1{,}258 \times 10^{-2}$ | 0,505 9 | 117,381 | 342,6 | 67,0 |
| Saône | 1 134,58 | 8,6 | 30,0 | $1{,}214 \times 10^{-2}$ | 0,407 8 | 44,661 | 211,3 | 107,6 |
| Maures | 541,13 | 11,8 | 30,0 | $0{,}794 \times 10^{-2}$ | 0,590 0 | 389,034 | 623,7 | 34,2 |

On aboutit ainsi à l'expression des surfaces spécifiques et du diamètre équivalent des particules pour les différents types de sables que nous résumons ci-après :

| Sables | Surfaces spécifiques (en $cm^2/g$) | Écarts entre les doubles (en $cm^2/g$) | Diamètres équivalents ($d$ en $\mu$) |
|---|---|---|---|
| Billes | 126,4 | 1,4 | 180,4 |
| Fontainebleau | 196,4 | 8,0 | 115,4 |
| Plaquettes | 203,7 | 6,2 | 118,7 |
| Saône | 216,4 | 10,2 | 105,2 |
| Bordeaux | 259,6 | 2,0 | 86,4 |
| Serre | 325,6 | 8,7 | 70,4 |
| Vivarais | 435,6 | 4,4 | 51,5 |
| Morvan | 461,0 | 2,1 | 49,1 |
| Maures | 550,9 | 20,1 | 39,2 |

Il en ressort que :

— la surface spécifique est très dépendante des types de sables. Par exemple, celle des schistes des « Maures » est 4 fois supérieure à celle des « Billes » ;

— on peut classer les sables étudiés en 4 groupes :

- à très faible surface spécifique voisine de 120 $cm^2/g$ : Billes;
- à faible surface spécifique voisine de 200 à 220 $cm^2/g$ : Fontainebleau, Plaquettes, Saône ;
- à moyenne surface spécifique entre 250 et 350 $cm^2/g$ : Bordeaux, Serre ;
- à forte surface spécifique de 340 à 550 $cm^2/g$ : Vivarais, Morvan, Maures.

Le diamètre moyen équivalent des particules, c'est-à-dire le diamètre théorique moyen des particules supposées sphériques qui donnerait une vitesse de filtration analogue présente une signification intéressante dans le cas des particules pseudo-sphériques, mais devient difficilement interprétable dans les cas de particules très aplaties comme les schistes des « Maures ».

*Étude critique de la méthode.*

*Valeur du débit $\varphi$ :*

Afin de vérifier la régularité de l'écoulement, nous avons mesuré par pesée les quantités d'eau percolées toutes les 10 minutes et calculé le débit $\varphi$ en $cm^3$ par heure.

La figure 4 représente les courbes ainsi obtenues pour 4 types de sables choisis comme exemples. On peut constater la parfaite régularité du débit dans tous les cas et assimiler ces courbes à des droites de pentes différentes en fonction des types de sables.

*Précision:* Il ne nous est pas possible de faire un calcul d'erreur puisque nous ne possédons que deux déterminations par échantillon. Cependant, avec une même charge d'eau H, les doubles, dont les écarts figurent au tableau précédent, nous semblent satisfaisants.

*Influence de la charge H :*

Afin de vérifier l'application de la loi de Darcy, nous avons fait varier la charge sur quelques exemples, en prenant une hauteur d'eau de 30 cm.

Les résultats de ces essais figurent au bas du tableau 5.

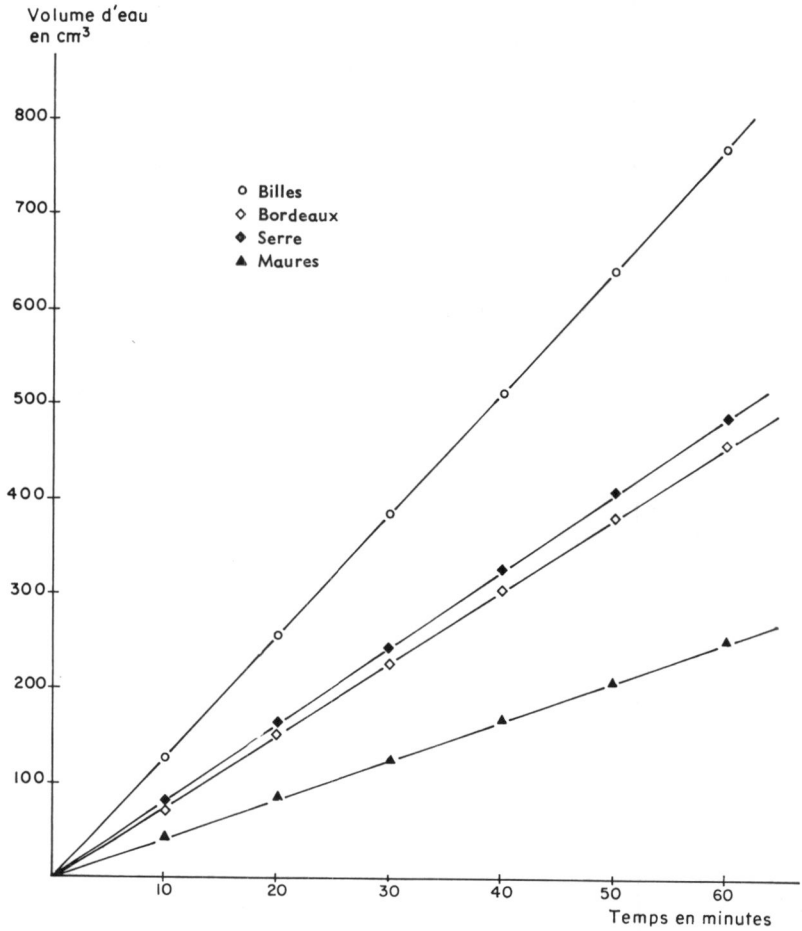



FIG. 4. — *Courbes d'écoulement de l'eau pour quelques populations*

Nous pouvons en déduire une comparaison des écarts obtenus sur les surfaces spécifiques, pour une charge de 30 cm :

| | Écarts entre les doubles (en cm²/g) | | Écarts par rapport à la surface spécifique moyenne obtenue avec H = 14,5 cm (en cm²/g) |
|---|---|---|---|
| | H = 14,5 cm | H = 30 cm | |
| Billes ..... | 1,4 | 0,1 | + 5,5 et + 5,4 |
| Serre ..... | 8,7 | 22,5 | — 5,5 et + 17,0 |
| Saône ..... | | | — 5,1 |
| Maures ..... | | | + 72,8 |

En ce qui concerne « Billes », « Serre » et « Saône », les écarts obtenus avec des charges différentes 14,5 et 30 cm, sont du même ordre de grandeur que ceux des doubles d'une même charge. Par contre, pour « Maures », l'écart est nettement supérieur, mais nous n'en connaissons pas la raison.

### 5. — *Porosité*

Les résultats des mesures de porosité sont consignés au tableau 6. Chacun des types de sables est caractérisé par 2 valeurs de la porosité, l'une « sans tassement » P, et l'autre « avec tassement » $P_t$, obtenues dans les conditions expérimentales décrites précédemment.

— La porosité « sans tassement » est toujours supérieure à la porosité « avec tassement », mais beaucoup moins dans le cas des faibles porosités, par exemple « Billes »

TABLEAU 6

*Porosité des sables*

| Populations | Densité réelle | Sans tassement — P | | | Avec tassement — $P_t$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Poids sable (en g) | Densité apparente | Porosité (en %) | Poids sable (en g) | Densité apparente | Porosité (en %) |
| Billes ..... | 2,631 | 37,93 | 1,607 | 38,92 | 41,16 | 1,744 | 33,71 |
| Plaquettes ..... | 2,482 | 29,50 | 1,250 | 49,64 | 37,10 | 1,572 | 36,66 |
| Bordeaux..... | 2,674 | 28,36 | 1,202 | 55,05 | 35,96 | 1,524 | 43,00 |
| Fontainebleau .... | 2647 | 32,54 | 1,379 | 47,90 | 39,09 | 1,656 | 37,44 |
| Saône ..... | 2,637 | 31,93 | 1,353 | 48,69 | 37,97 | 1,609 | 38,98 |
| Serre ..... | 2,614 | 27,20 | 1,152 | 55,93 | 33,72 | 1,429 | 45,33 |
| Morvan ..... | 2,647 | 24,72 | 1,047 | 60,44 | 30,44 | 1,290 | 51,27 |
| Vivarais ..... | 2,673 | 26,75 | 1,133 | 57,61 | 33,26 | 1,409 | 47,29 |
| Maures ..... | 2,776 | 19,42 | 0,823 | 70,35 | 29,40 | 1,246 | 55,11 |

($P = 38{,}92$ et $P_t = 33{,}71$) que dans le cas des fortes porosités : « Maures » ($P = 70{,}35$ et $P_t = 55{,}11$).

— L'analyse du tableau 6 nous indique que les différents sables se classent dans le même ordre pour les 2 types de porosité.

Nous distinguerons 4 groupes :

| | P<br>Sans tassement | $P_t$<br>Avec tassement |
|---|---|---|
| — Très faible porosité : Billes | inf. à 40 | inf. à 34 |
| — Faible porosité : Fontainebleau, Saône, Plaquettes | de 45 à 50 | de 36 à 40 |
| — Moyenne et forte porosité : Bordeaux, Serre, Vivarais, Morvan | de 55 à 61 | de 43 à 52 |
| — Très forte porosité : Maures | sup. à 70 | sup. à 55 |

*Précision des mesures :*

La mesure de la porosité $P_t$ a donné lieu à des doubles dont l'écart maximum a été obtenu avec « Billes » 41,02 et 41,31 et l'écart minimum avec « Serre » 33,69 et 33,72.

La mesure de la porosité P avec 4 répétitions nous a permis de calculer une erreur absolue qui se situe ainsi pour 3 types de sables :

| | | |
|---|---|---|
| maximale | Fontainebleau | E = 0,335 p. 100 |
| minimale | Bordeaux | E = 0,104 — |
| médiane | Billes | E = 0,138 — |

Cette mesure est donc particulièrement précise.

## D. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Au cours du précédent chapitre, nous avons exposé les résultats obtenus en soumettant les 9 populations de sables choisies à un certain nombre de techniques expérimentales. Le dépouillement de ces résultats nous a permis de classer pour chacune de ces techniques, les 9 populations de sables les unes par rapport aux autres et aussi d'en dégager des groupes de comportement identique ou voisin.

Leur interprétation va nous conduire à envisager successivement, d'une part, la caractérisation des particules, en l'occurrence, des grains de sables, à l'intérieur d'une même population, d'autre part, la caractérisation globale des populations par des valeurs moyennes, et enfin leur comportement dû à certaines formes d'assemblage élémentaire.

### 1. — *Caractérisation élémentaire à l'intérieur des populations*

Les caractéristiques minéralogiques, morphoscopiques et morphométriques nous ont montré l'hétérogénéité de composition élémentaire des diverses populations, due, en ce qui concerne les sables naturels, à leurs différences d'origine et d'histoire géologiques. Nous envisagerons cette hétérogénéité selon trois critères : nature minéralogique, forme et taille des particules élémentaires.

a) *Nature minéralogique.*

Les trois populations artificielles sont, bien sûr, homogènes : « Billes » et « Plaquettes » sont en verre de composition constante, « Bordeaux » uniquement constituée de quartz concassés.

Parmi les sables naturels :

— une population est homogène : Fontainebleau ;

— deux populations sont peu hétérogènes : Saône et Serre qui contiennent une forte majorité de quartz et une minorité de feldspaths ;

— trois populations sont très hétérogènes : Morvan, Vivarais et Maures qui renferment en particulier, à côté du quartz et des feldspaths, des minéraux phylliteux, les micas en proportion variable.

En fait, pour ce qui concerne ce travail, où seul importe l'aspect physique des grains en tant que squelette d'un assemblage, le facteur essentiel réside dans l'incidence de la nature minéralogique sur la forme du grain. Ainsi, quartz et feldspaths

pourront être confondus, de même les diverses familles de micas, biotite, muscovite ou chlorite n'auront pas d'incidence. Par contre, la proportion de micas dans les populations aura une très grande influence et conditionnera directement le comportement global des populations « Morvan », « Vivarais » et « Maures ».

Notons également, sur le plan des relations entre origine et histoire géologiques d'une part, et nature minéralogique d'autre part, que les populations très hétérogènes sont toutes issues d'arènes, donc de matériaux primaires, pratiquement en place (granite, gneiss, micaschistes) tandis que les populations homogènes proviennent ou de matériaux secondaires (grès), ou de matériaux primaires transportés (sables alluviaux ou marins).

Il est intéressant à ce propos de préciser les caractéristiques essentielles des terrains géologiques desquels ces sables sont issus sur place ou après transport. On peut les résumer ainsi :

— Fontainebleau : les sables stampiens de la forêt de Fontainebleau sont constitués de quartz presque purs ;

— Saône : les matériaux sableux qui ont formé après transport certaines terrasses de la Saône, sont issus vraisemblablement des Vosges. Ils contiennent donc essentiellement les 2 minéraux qui résistent le mieux à l'érosion fluviatile, le quartz et les feldspaths potassiques ;

— Serre : le grès vosgien est un grès quartzeux ;

— Morvan : le massif de la Pierre-qui-Vire situé dans le Morvan Nord est constitué par du granite à 2 micas dont l'arène renferme en moyenne (DEJOU, 1966) :

| | |
|---|---|
| quartz | 35 p. 100 |
| feldspaths K | 25 — |
| plagioclases | 33 — |
| micas | 6 à 7 p. 100 |

— Vivarais : les migmatites ou gneiss à grain grossier sont des roches formées de quartz, de feldspaths potassiques et calciques et accessoirement de biotite ;

— Maures : ces micaschistes ou schistes sériciteux contiennent une très forte proportion de micas (biotite et muscovite).

b) *Forme.*

Une seule population présente une forme élémentaire unique, c'est celle des « Billes », assimilées à des sphères.

Les deux autres populations artificielles sont beaucoup moins homogènes. Les « Plaquettes » ont, certes, un caractère aplati dominant mais la charte morphométrique de Krumbein nous donne des indices de sphéricité (qui mesure ici en fait l'aplatissement) allant de 0,3 à 0,5 ce qui est logique puisqu'elles sont issues de plaques de verre d'épaisseur calibrée entre 50 et 80 μ, concassées, puis tamisées entre 100 et 160 μ. « Bordeaux » a des formes toutes très anguleuses mais avec des indices de sphéricité compris entre 0,3 et 0,7.

Pour les sables naturels, deux cas sont à envisager : s'ils ne renferment pas de micas, nous avons vu que les grains ont en majorité des formes non aplaties pour l'ensemble des populations avec des indices de sphéricité de 0,5 à 0,7 (voir fig. 2) mais, par contre, des indices d'arrondi variables : élevés pour « Fontainebleau », moyens pour « Saône » et « Serre ».

S'ils renferment des micas, la population sera particulièrement hétérogène et comprendra à la fois des grains de forme légèrement arrondie (Vivarais) ou anguleuse (Morvan) et des plaquettes micacées dont l'indice de sphéricité (ici aplatissement) peut être estimé, par analogie, avec la charte de Krumbein à 0,1 (rapport $\frac{e}{L} = 1/10$).

L'incidence de ces micas sera, bien entendu, fonction de leurs proportions respectives à l'intérieur des populations, 10 p. 100 pour « Morvan », 20 p. 100 pour « Vivarais », et 70 p. 100 pour « Maures ».

c) *Taille.*

En principe, nous avons, pour chacune des populations, limité l'hétérogénéité de taille des particules en réalisant un tamisage dans des limites assez étroites entre 100 et 160 μ selon le principe de l'analyse granulométrique, avec des tamis à mailles carrées.

Pour des sphères (Billes) ou des particules pseudo-sphériques ou pseudo-équidimensionnelles (Fontainebleau, Saône, Serre) les rapports de diamètre ou de plus petites dimensions varieront donc de 1 à 1,6. Par contre, pour les particules anguleuses (Bordeaux) ou aplaties (Plaquettes) ou à plus forte raison pour les micas, cette taille diamétrale, base de la caractérisation granulométrique n'est plus valable. On peut imaginer que les plaquettes de micas traversent les mailles selon une diagonale du carré de 160 μ de côté, c'est-à-dire comprennent une population avec des particules élémentaires de largeur comprise entre 100 et $160\sqrt{2} = 226$ μ.

Ceci nous permet de constater l'imperfection du critère diamétral, en tant que base de l'analyse granulométrique, lorsque les formes des particules sont très diversifiées. Nous retrouverons d'ailleurs cette imperfection pour d'autres caractéristiques.

Pour conclure ce paragraphe consacré au problème de l'hétérogénéité à l'intérieur des populations, on peut dire que les trois critères choisis, nature minéralogique, forme et taille des particules ne sont pas indépendants l'un de l'autre mais au contraire étroitement liés, la taille et la forme des particules découlant souvent de leur nature minéralogique, elle-même liée à leur origine et leur histoire géologiques.

### 2. — *Caractérisation globale des populations*

a) *Importance et incidence de la forme des particules élémentaires.*

Après avoir étudié l'hétérogénéité de forme des particules à l'intérieur des populations que nous avons exprimée par des courbes morphométriques représentant les indices de sphéricité et d'arrondi, il nous faut tenter de caractériser chacune des populations par des indices moyens susceptibles de rendre compte de la notion de forme.

Or, divers auteurs, CAILLEUX, KRUMBEIN, TRASK, RIVIÈRE, (CAILLEUX, 1963), ont proposé pour caractériser les courbes morphométriques relatives à l'étude des sables et des galets, un certain nombre d'indices numériques. Parmi les plus connus, nous citerons la médiane, dont l'ordonnée est 50 p. 100 mais qui doit être accompagnée des 1er et 3e quartiles, abscisses dont les ordonnées sont respectivement 25 et 75 p. 100. Ces trois grandeurs obtenues par la méthode graphique, permettent, en général, une bonne caractérisation des populations.

Dans le cas présent, avec seulement 3 ou 4 points pour déterminer une courbe et l'obligation d'avoir, si possible, un seul indice numérique pour caractériser celle-ci, nous avons préféré déterminer un indice numérique moyen de sphéricité et d'arrondi, obtenu pour chaque courbe en calculant la moyenne des indices élémentaires cumulés.

Ce sont ces grandeurs qui figurent ci-après :

| | Indice moyen de sphéricité | Indice moyen d'arrondi |
|---|---|---|
| Fontainebleau | 0,595 | 0,427 |
| Saône | 0,590 | 0,315 |
| Serre | 0,560 | 0,303 |
| Morvan | 0,520 | 0,230 |
| Vivarais | 0,612 | 0,309 |

En fait, ces chiffres ne concernent que cinq populations sur neuf et, souvenons-nous, les études morphométriques n'ont été effectuées que sur les quartz (et par analogie les feldspaths) de la fraction de densité inférieure à 2,68, c'est-à-dire qu'elles excluent en particulier les micas.

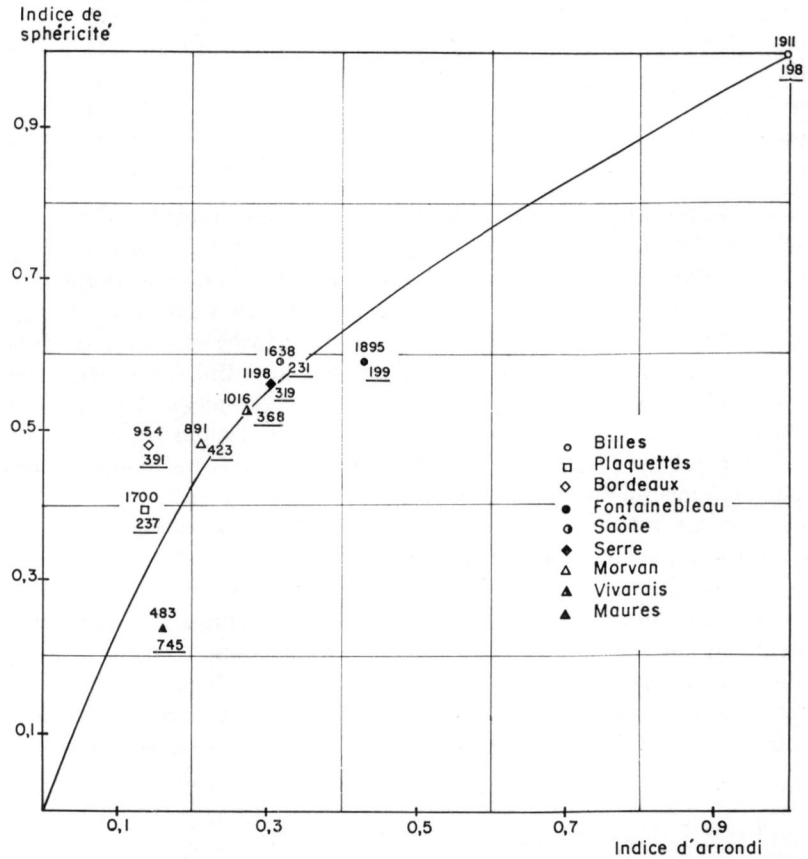



FIG. 5. — *Représentation des indices moyens de sphéricité et d'arrondi sur la charte de Krumbein et relations avec la densité de population* (en milliers de grains par gramme — chiffres soulignés) *et le volume moyen élémentaire* (en milliers de $\mu^3$)

Il en résulte que trois populations seulement : « Fontainebleau », « Saône » et « Serre », peuvent être caractérisées par ces chiffres. En ce qui concerne les deux autres : « Morvan » et « Vivarais », ainsi que « Maures » qui contiennent des micas, nous avons calculé ces indices moyens par analogie en introduisant les micas proportionnellement à leur pourcentage, respectivement : 10, 20 et 70 p. 100 dans les populations, et en quantifiant chacune des plaquettes de micas par un indice de sphéricité de 0,1 (ici en fait aplatissement) et un indice d'arrondi de 0,1 également.

D'autre part, les populations artificielles ont été également identifiées directement sur la charte de Krumbein pour Plaquettes et Bordeaux, et pour les Billes en prenant les indices théoriques de la sphère, $i_s = I$, $i_a = I$. De cette façon, nous pouvons donc caractériser les neuf populations de sables par les valeurs suivantes :

| | Indice moyen de sphéricité | Indice moyen d'arrondi |
|---|---|---|
| | — | — |
| Billes | I | I |
| Plaquettes | 0,398 | 0,140 |
| Bordeaux | 0,479 | 0,148 |
| Fontainebleau | 0,595 | 0,427 |
| Saône | 0,590 | 0,315 |
| Serre | 0,560 | 0,303 |
| Morvan | 0,481 | 0,211 |
| Vivarais | 0,527 | 0,274 |
| Maures | 0,235 | 0,160 |

Ces indices moyens nous permettent de représenter graphiquement par *un seul point* une population sur la charte morphométrique de Krumbein en portant en abscisses les indices d'arrondi et en ordonnées les indices de sphéricité. C'est cette représentation qui figure à la figure 5. Nous aboutissons à un nuage de points que l'on peut approximativement répartir le long d'une courbe que nous avons dessinée.

Aux deux extrémités de cette courbe figurent les « Billes », sphères théoriques et une population théorique comprenant 100 p. 100 de micas, d'épaisseur tendant vers 0. Beaucoup plus regroupées sont les diverses populations testées mais que l'on peut parfaitement différencier depuis les formes arrondies jusqu'aux formes anguleuses puis aplaties en suivant la courbe du haut vers le bas :

— formes arrondies et peu anguleuses : Fontainebleau, Saône, Serre ;

— formes anguleuses : Bordeaux et Plaquettes ;

— populations avec micas : Vivarais, Morvan et Maures.

A noter que « Morvan » se situe en-dessous de « Vivarais », bien que possédant moins de micas car ses autres formes sont plus anguleuses.

Nous pouvons, dès ce stade, entrevoir l'imperfection de la méthode de tamisage des sables, incluse dans l'analyse granulométrique qui classe de la même façon, c'est-à-dire, par un seul pourcentage pondéral, des sables de formes totalement différentes.

b) *Relation forme des particules-densité de population.*

Les comptages statistiques de grains ont montré que les divers types de sables avaient des densités de population exprimées en nombre de grains par gramme très

diverses, variant, par exemple, dans une proportion de 1 à 5 pour les « Billes » et les « Maures ». Ceci peut évidemment paraître curieux compte tenu du fait qu'ils ont tous été soumis à un même tamisage dans une échelle de taille réduite 100-160 μ, qui, en principe, pour des tailles sensiblement équivalentes devrait garantir des densités de populations voisines.

Nous allons préciser ce phénomène en juxtaposant les valeurs des densités de population à notre représentation globale des formes présentées figure 5. On constate, en effet, que les densités de population, exprimées en milliers de grains (chiffres soulignés), sont en ordre croissant, le long de la courbe, précédemment décrite, du haut en bas et depuis les formes les plus arrondies jusqu'aux formes les plus aplaties. Ainsi, existe-t-il un lien incontestable, difficile à exprimer sous la forme d'une relation chiffrée entre la forme et le nombre de particules constituant les populations. L'examen de ce graphique impose d'autres remarques :

— une exception à la règle précédemment émise, celle des « Plaquettes » qui, aplaties et anguleuses devraient avoir une densité de population beaucoup plus élevée.

Cette anomalie s'explique, à notre avis, par la méthode utilisée pour les préparer. Elles sont, en effet, issues de lames de verre de grandes dimensions, par concassage alternant avec des tamisages fréquents. Ainsi, on récupère des plaquettes comprises, certes, entre 100 et 160 μ mais en majorité plus proches de 160 μ. Leur taille moyenne est donc vraisemblablement supérieure à celle des formes voisines comme, par exemple « Bordeaux », ce qui est confirmé par un examen au binoculaire ; et en conséquence, leur densité de population est nettement inférieure.

Autre remarque : les « Billes » constituées de formes sphériques idéalement arrondies offrent une densité de population voisine de celle de « Fontainebleau », ce qui laisse supposer que, pour cette échelle de taille (100-160 μ), le nombre minimum de particules est de l'ordre de 200 000 par gramme. On peut d'ailleurs calculer le diamètre moyen des billes assimilées à des sphères, correspondant à cette densité de population, à partir du volume élémentaire :

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = 1911 \times 10^3 \mu^3$$

soit : $R = 77\mu$ et $d_m = 144\mu$

ce qui situe bien le diamètre moyen entre les limites de tamisage.

Il reste à expliquer la raison de ce lien existant entre la forme des particules et la densité de population. C'est en abordant la notion de volume moyen élémentaire que nous le ferons.

c) *Notion de volume spécifique et de volume moyen élémentaire.*

La mesure des densités réelles nous a conduit à calculer les volumes spécifiques qui expriment le volume théorique occupé par 1 g de sable.

Ces densités étant peu différenciées, les volumes spécifiques ne le sont pas non plus, ainsi qu'on peut le constater au tableau 4, c'est-à-dire que chacun des types de sables occupe à poids identique un volume sensiblement équivalent. Cette constatation donne toute sa valeur, de ce point de vue, à la détermination des pourcentages pondéraux dans l'analyse granulométrique.

Le quotient de ce volume spécifique $V_s$, par le nombre de grains par gramme $n$, exprime le volume moyen élémentaire $V_e$, c'est-à-dire, rappelons-le, le volume réel occupé par la particule moyenne de la population.

Ainsi que nous l'avons déjà constaté à l'analyse des résultats du tableau 4, le volume moyen élémentaire permet un classement des différents types de sables dans un ordre inverse de celui des densités de population. On peut d'ailleurs le relier également au critère de forme des particules sur la charte de KRUMBEIN, ainsi qu'en témoigne la figure 5, les formes arrondies correspondant aux volumes élémentaires les plus élevés et inversement.

Pour expliquer ce phénomène, envisageons ce qui se passe au niveau d'une maille de tamis pour les deux cas extrêmes, celui d'une bille sphérique et celui d'une plaquette de mica dont on peut assimiler la forme à un prisme droit à base carrée de faible épaisseur (1/10 du côté du carré).

Ainsi que le montre le schéma ci-après (fig. 6), les deux particules de taille maximale qui traversent une maille de côté $a$ sont :

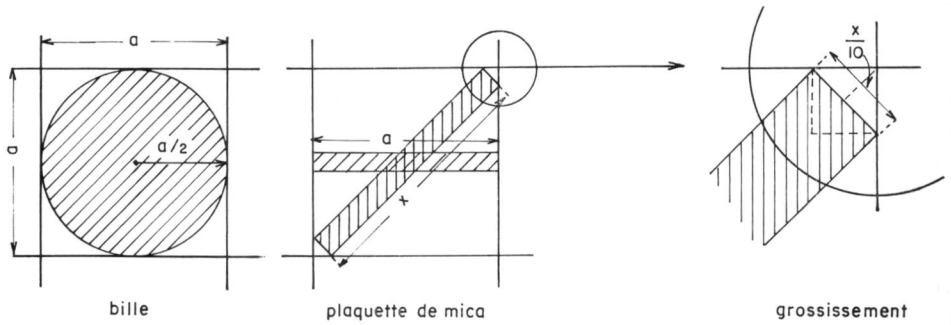



FIG. 6. — *Dimensions maximales des particules sphériques et aplaties qui traversent la maille du tamis*

— une sphère de diamètre $a$, c'est-à-dire de volume :

$$v = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{a}{2}\right)^3 = \frac{4}{3} \times \frac{1}{8} \times 3{,}14\,a^3 = 0{,}523\,a^3$$

— un prisme droit à base carrée :

- de côté $a$ et d'épaisseur $\frac{a}{10}$ s'il passe parallèlement aux côtés

  et de volume : $v_1 = a \times a \times \frac{a}{10} = 0{,}1\,a^3$

- ou bien de côté $x$ et d'épaisseur $\frac{x}{10}$ s'il passe suivant une diagonale avec :

$$x + \frac{x}{10} = a\sqrt{2} \quad \# \quad \frac{11x}{10} = 1{,}414\,a \qquad \text{soit} \qquad x = 1{,}285\,a$$

et de volume : $v_2 = 1{,}285\ a \times 1{,}285\ a \times 0{,}128\ a = 0{,}211\ a^3$.

Ces calculs nous indiquent que, théoriquement, le volume des billes est toujours supérieur à celui des plaquettes de micas et dans un rapport variant entre 2,5 et 5,2.

Or, le rapport calculé des volumes moyens élémentaires des populations « Billes » et « Maures » est de 3,95, montrant ainsi la vraisemblance de notre explication puisque ce chiffre se situe presque au milieu de l'intervalle 2,5-5,2.

Ajoutons, malgré tout, que les plaquettes de micas peuvent avoir des formes de base moins régulières et que d'autre part la population « Maures » est « contaminée » par 30 p. 100 de quartz et feldspaths.

Il est évident que des processus du même ordre se produisent également avec les autres types de sables qui ont des formes moins simples avec dans tous les cas un passage de maille qui autorise des volumes élémentaires d'autant plus grands que la particule à une forme plus arrondie et inversement.

d) *Notion de surface spécifique et de surface moyenne élémentaire.*

La notion de surface spécifique est de première importance dans l'étude des solides divisés ; elle conditionne, en particulier, les phénomènes d'adsorption. En Agronomie par exemple, elle est un critère fondamental de caractérisation des différentes familles d'argiles et s'exprime en $m^2/g$.

Dans le cas des sables que nous étudions, où les dimensions des particules sont beaucoup plus grandes (de l'ordre de 100 $\mu$), elle est faible et s'exprime en $cm^2/g$.

Les résultats de la perméamétrie nous ont indiqué que les surfaces spécifiques ainsi déterminées étaient très différentes selon les populations de sables et d'autant plus élevées que les particules étaient plus anguleuses et plus aplaties. Nous avons tenté de relier les valeurs de ces surfaces spécifiques à celles des densités de populations, ces deux variables pouvant logiquement être dépendantes l'une de l'autre.

Les calculs statistiques nous ont montré que cette liaison était très étroite puisqu'il existe entre elles une équation de régression hautement significative que l'on peut formuler ainsi :

$$S\ cm^2/g = 0{,}735\ n + 53{,}8$$

avec un coefficient de corrélation $r = 0{,}878$.

Nous avons représenté sur la figure 7 les variations de la surface spécifique en fonction des densités de population et tracé la droite de régression correspondante.

Ces résultats nous indiquent donc que la surface spécifique mesurée expérimentalement par perméamétrie est étroitement dépendante du nombre de particules par unité de poids dans chacune des populations. Or, puisque cette dernière grandeur, nous l'avons vu précédemment, est liée elle-même à la forme des particules, nous pouvons conclure que la surface spécifique dépend, elle aussi, de façon indirecte, de cette forme.

*Valeur du coefficient de forme dans la formule de Kozeny.*

L'examen de la figure 7 nous permet de remarquer que la valeur de S pour les « Maures » fait nettement infléchir la droite de régression vers le bas. Or, n'oublions pas que les valeurs de S obtenues avec la technique de perméamétrie en application de la loi de Kozeny dépendent d'un coefficient de forme $k$, que l'on a déterminé expérimentalement en fixant les valeurs suivantes :

$k = 5{,}0$ pour des particules sphériques,

$k = 3{,}1$ pour des fibres de verre parallèles au sens de l'écoulement,

$k = 6{,}0$ pour les mêmes fibres de verre perpendiculaires au sens de l'écoulement.

Nous avons adopté, dans un premier temps, $k = 5$ pour l'ensemble des populations, mais il est évident que, en particulier dans le cas extrême des « Maures », cette valeur de $k$ ne convient pas. Pour vérifier ceci, nous avons calculé l'équation de régression sans tenir compte des « Maures ». Elle est la suivante :

$$y = 1{,}125\ x - 55{,}3$$

également hautement significative, avec un coefficient de corrélation du même ordre que le précédent $r = 0{,}858$.

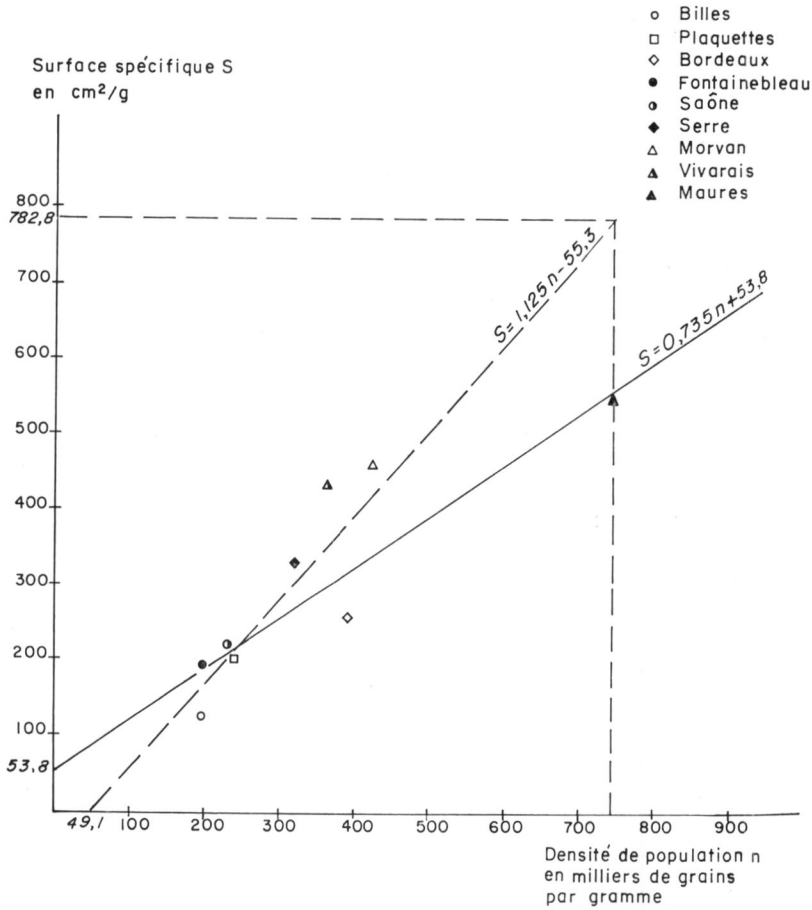



FIG. 7. — *Relations entre la surface spécifique S et la densité de population n*

Puis, nous avons déterminé à partir de cette équation, la valeur de S pour la densité de population des « Maures ». On obtient $S = 782{,}8$ cm²/g, c'est-à-dire, une valeur nettement supérieure à celle obtenue précédemment qui, par application de la formule de Kozeny nous permet d'en déduire la valeur correspondante du coefficient de forme $k = 2{,}87$.

Ainsi, il est raisonnable de penser que pour calculer la surface spécifique des particules dans le cas de plaquettes minces comme les micas, il est préférable de

donner au coefficient $k$ la valeur 3 plutôt que 5. Par ailleurs, il est évident que, en fonction de la diversité des formes de particules, il serait nécessaire d'apporter au coefficient $k$ un facteur correctif d'autant plus important que les formes sont plus anguleuses et aplaties. Notons, à ce sujet, que sur le graphique 7, les sables anguleux de « Bordeaux » suivent la même tendance que les schistes des « Maures ».

Une autre caractéristique, difficilement estimable, revêt aussi à notre avis une certaine importance, c'est l'état de la surface des minéraux qui peuvent être selon le façonnement auquel ils ont été soumis, lissés, polis, légèrement striés ou burinés. Il est vraisemblable que cet aspect de la surface des grains influe sur la vitesse d'écoulement dans la technique de perméamétrie. Les « Billes », par exemple, offrent une surface polie particulièrement favorable, qui peut expliquer que le diamètre équivalent obtenu est supérieur à l'intervalle 100-160 μ.

*Diamètre équivalent.*

Le diamètre équivalent, diamètre théorique moyen des particules supposées sphériques, présente, nous semble-t-il, peu d'intérêt tant il est loin de la réalité morphologique.

Il permet seulement de montrer, que, par exemple, les schistes des « Maures » offrent une surface spécifique équivalente à celle obtenue avec des sphères de 40 μ de diamètre, donc de la taille des limons grossiers. Mais là s'arrête l'interprétation.

*Surface moyenne élémentaire.*

Le quotient de la surface spécifique exprimée en cm² par gramme par le nombre de grains par gramme nous permet de calculer la surface moyenne du grain pour chacune des populations, soit $s_e = \frac{S}{n}$ en μ².

En voici les résultats en μ² :

| Populations | $s_e$ en μ² | $\frac{v_e \text{ en } \mu^3}{s_e \text{ en } \mu^2}$ |
|---|---|---|
| Billes | 63 500 | 30,1 |
| Plaquettes | 85 900 | 19,8 |
| Bordeaux | 66 200 | 14,4 |
| Fontainebleau | 98 500 | 19,2 |
| Saône | 93 400 | 17,5 |
| Serre | 101 900 | 11,7 |
| Morvan | 108 700 | 8,2 |
| Vivarais | 118 000 | 8,6 |
| Maures | 73 900 | 6,5 |

Ces chiffres nous indiquent que la surface moyenne élémentaire varie relativement peu d'une population à l'autre, et si, comme pour le volume moyen élémentaire, on place ces valeurs sur la courbe représentative des formes de particules (fig. 8), on constate tout au plus que les surfaces les plus élevées de l'ordre de 100 000 μ² se situent vers les formes moyennes.

Pour expliquer ces constatations qui montrent que, dans les conditions de sélection des particules par un tamisage entre deux valeurs de mailles, les surfaces élémentaires restent, quelle que soit leur forme, peu différentes tandis que les volumes élémentaires varient beaucoup, prenons encore les deux cas extrêmes, celui des « Billes » et celui des schistes des « Maures » (voir fig. 6).

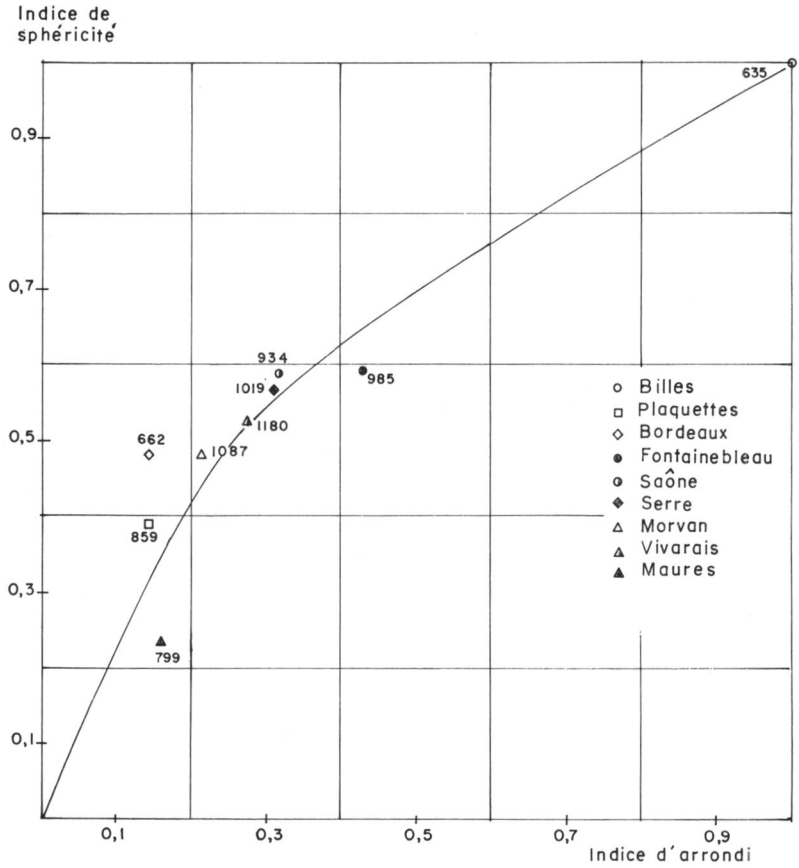



FIG. 8. — *Relations entre la forme des particules et la surface moyenne élémentaire* (en $10^2\ \mu^2$)

La surface d'une bille est :

$$s = \pi\, a^2 = 3{,}14\, a^2$$

Celle d'une lamelle de mica définie comme précédemment :

— si elle passe parallèlement aux côtés :

$$s_1 = 2\,a^2 + 4\left(\frac{a}{10} \times a\right) = \frac{24\,a^2}{10} = 2{,}4\,a^2$$

— si elle passe dans la diagonale de la maille :

$$s_2 = 2\,(1{,}285\,a)^2 + 4\,(1{,}285\,a \times 0{,}128\,a)$$

soit après calcul : $s_2 = 3{,}96\,a^2$

Ainsi, à l'aide de ces calculs effectués sur des formes théoriques très différentes, on se rend compte que les surfaces élémentaires des particules restent en moyenne du même ordre de grandeur. Les chiffres de la perméamétrie nous confirment qu'il en est de même avec des formes plus complexes.

On peut, d'autre part, vérifier la validité des valeurs obtenues pour les surfaces moyennes élémentaires qui, rappelons-le, résultent de deux déterminations analytiques différentes : la densité de population par comptage et la surface spécifique par perméamétrie, toujours à partir des « Billes » et des « Maures ».

— pour les Billes :

$$s_e = \pi\, d^2 = 63{,}500\ \mu^2 \qquad \text{si } d \text{ est le diamètre de la sphère;}$$

ce qui donne un diamètre moyen $d_m = 142\ \mu$, pratiquement identique à celui obtenu en faisant le calcul à partir du volume moyen élémentaire $d_m = 144\ \mu$;

— pour les schistes des Maures :

$$s_e = 2{,}4\, d^2 = 73{,}900\ \mu^2$$

soit $d = 175\ \mu$ si $d$ est le côté du carré, base de la lamelle de mica assimilée à un prisme droit.

Ainsi, le diamètre moyen calculé, pour les Billes, se place parfaitement dans l'intervalle des mailles 100-160 $\mu$ tandis que pour les Maures, avec 175 $\mu$, $d$ se situe au-dessus de la maille 160 $\mu$, laissant supposer qu'un certain nombre de lamelles passent effectivement dans une position voisine de la diagonale de la maille. Le même calcul fait en assimilant les quartz arrondis de « Fontainebleau » à des sphères donne $d = 177\ \mu$, donc au-dessus de la maille maximale 160 $\mu$, ce qui indique à notre avis que les particules de forme plus complexe et en particulier celles qui présentent un certain allongement ont tendance à passer, tout naturellement suivant leurs plus petites dimensions.

*Rapport volume moyen élémentaire sur surface moyenne élémentaire.*

Ce rapport $\dfrac{\text{volume}}{\text{surface}}$ qui caractérise théoriquement la particule moyenne de chaque population varie beaucoup en fonction des types de sables ainsi qu'en témoignent les chiffres présentés au tableau précédent. Les valeurs s'étalent largement entre 30,1 pour les « Billes » et 6,5 pour les schistes des « Maures » montrant ainsi qu'elles sont d'autant plus élevées que les particules ont des formes plus équidimensionnelles.

On peut d'ailleurs faire un calcul théorique de ce rapport pour « Billes » et « Maures » :

$$\text{Bille} : \frac{v_e}{s_e} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{4\pi R^2} = \frac{R}{3} = \frac{d}{6} \qquad \text{si } d \text{ est le diamètre de la sphère.}$$

$$\text{Maures} : \frac{v_e}{s_e} = \frac{d \times d \times \frac{d}{10}}{2\,d^2 + 4\left(\frac{d}{10} \times d\right)} = \frac{0{,}1\, d^3}{2{,}4\, d^2} = \frac{d}{24} \qquad \text{si } d \text{ est le côté de la base du prisme.}$$

— si l'on prend le $d_{\,moyen}$ calculé égal à 142 $\mu$, on a :

$$\frac{v_e}{s_e} = \frac{d}{6} = \frac{142}{6} = 23{,}6$$

il est donc un peu inférieur au $\frac{v_e}{s_e} = 30{,}1$ obtenu à partir des mesures ;

— si l'on prend le $d_{moyen}$ calculé égal à 175 $\mu$, on a :

$$\frac{v_e}{s_e} = \frac{d}{24} = \frac{175}{24} = 7{,}2$$

soit un chiffre très proche du $\frac{v_e}{s_e}$ mesuré égal à 6,5.

### 3. — *Caractérisation de l'assemblage élémentaire*

Après avoir étudié les caractères intrinsèques des sables en montrant leur diversité de nature, de forme et de taille à l'intérieur d'une même population et tenté de caractériser globalement ces populations par des valeurs moyennes d'indices de forme, de volume ou de surface, nous abordons avec la mesure de la porosité, la notion d'assemblage de particules :

Elle peut être étudiée suivant deux aspects :
— un aspect quantitatif qui représente le volume global des vides,
— un aspect qualitatif qui envisage la forme de ces vides en fonction de l'arrangement du squelette.

a) *Aspect quantitatif de la porosité.*

Celui-ci ressort directement des résultats globaux obtenus par les mesures de porosité avec et sans tassement. Leur analyse nous a montré que ces porosités varient en fonction des types de sables et qu'on pouvait les classer dans un ordre croissant dans les deux cas, depuis les « Billes » jusqu'aux schistes des « Maures ». Afin de préciser ces variations, nous avons tenté de les rattacher à une variable dont nous avons précédemment étudié le comportement, à savoir le volume moyen élémentaire qui dépend de la forme des particules. Les calculs statistiques ont établi qu'une liaison étroite existait entre les deux variables sous la forme d'une régression linéaire.

Son expression est différente suivant qu'il s'agit de la porosité avec ou sans tassement :

Sans tassement, elle est :

$$P \text{ p. } 100 = -0{,}013\,54\ v_e + 71{,}40$$
significative à $P = 0{,}02$,

et avec tassement :

$$P_t \text{ p. } 100 = -0{,}013\,44\ v_e + 60{,}64$$
hautement significative à $P = 0{,}01$.

Leur représentation figure aux figures 9 et 10.

En fait, cette relation inverse entre la porosité et le volume moyen élémentaire traduit essentiellement le lien existant entre la porosité et la forme des particules, lien que l'on peut concrétiser une fois de plus en situant les valeurs des porosités sur la courbe qui représente les indices de sphéricité et d'arrondi (fig. 11). On y

remarque que les porosités vont régulièrement croissant lorsque l'on passe des formes arrondies aux formes anguleuses puis aplaties (exception faite pour les « Plaquettes »). Par ailleurs, les droites de régression pour les 2 types de porosité ont pratiquement la même pente mais une ordonnée à l'origine différente. Les variations de porosité restent donc les mêmes en fonction du volume moyen élémentaire, donc de la forme des particules, mais avec un décalage voisin de 10 p. 100. Notons pourtant que ce décalage est plus grand pour les fortes porosités (15 p. 100 dans le cas des « Maures ») et plus petit pour les faibles porosités (5 p. 100 dans le cas des « Billes »).

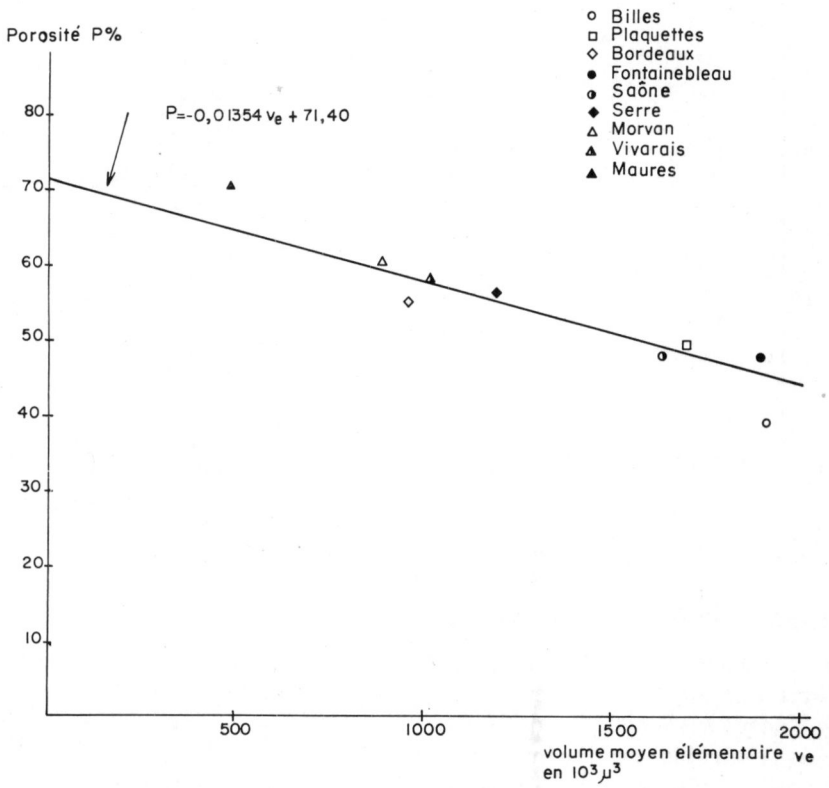



FIG. 9. — *Relation entre la porosité sans tassement P et le volume moyen élémentaire* $v_e$

Pour expliquer ces différences quantitatives, il est nécessaire de faire appel à l'aspect qualitatif de cette porosité, c'est-à-dire à la notion de forme des vides engendrés par l'empilement du squelette sableux.

*b) Aspect qualitatif de la porosité.*

L'étude des formes et dimensions des pores constitue la porométrie, qui devrait en principe apporter des explications au comportement des milieux poreux. Nous envisagerons successivement dans le cas de nos populations de sables, le mode d'assemblage des particules, la forme des vides et enfin leur dimension

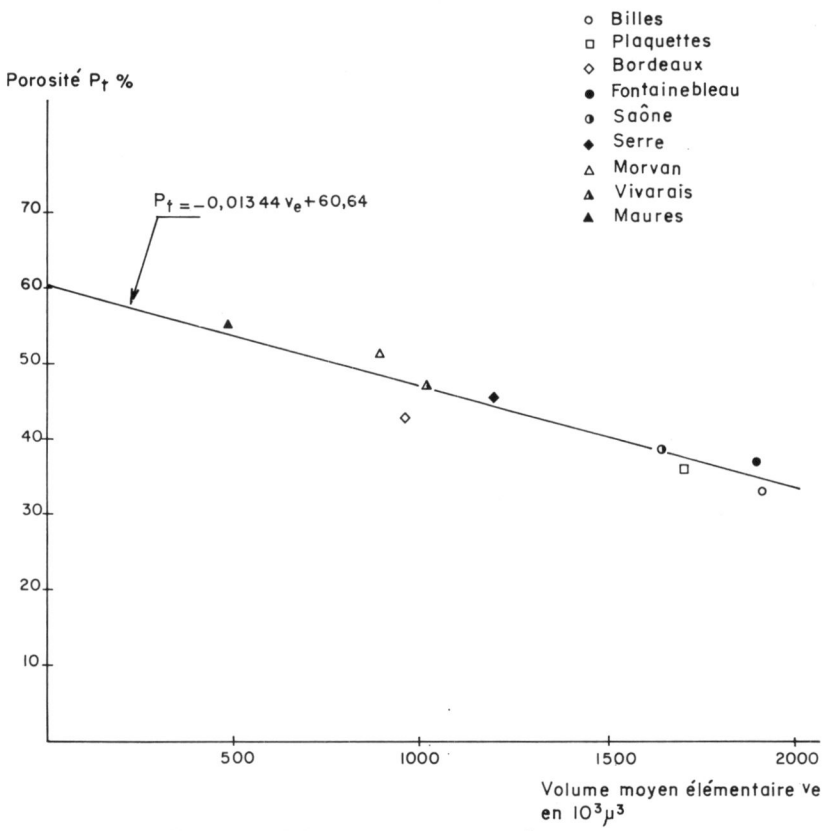



FIG. 10. — *Relation entre la porosité avec tassement $P_t$ et le volume moyen élémentaire $v_e$*

1. *Mode d'assemblage des particules.*

C'est seulement dans le cas des « Billes », supposées sphériques que nous pouvons envisager une approche de leur mode d'empilement. Il existe, en effet, 6 types d'assemblages systématiques de sphères. Parmi ceux-ci, le plus lâche est l'assemblage de type cubique qui ménage une porosité maximale de 47,64 p. 100 et le plus serré est l'assemblage de type rhomboédrique où la porosité minimale est égale à 25,95 p. 100. Or, nos mesures de porosité ont donné pour les « Billes » 38,92 p. 100 pour la porosité sans tassement et 33,71 p. 100 pour la porosité avec tassement, c'est-à-dire des valeurs intermédiaires entre celles des types d'assemblages précédents.

Dans le cas de la porosité sans tassement, on peut penser que l'arrangement est en majorité du type orthorhombique puisque la porosité correspondante est 38,54 p. 100.

Au contraire, avec un certain tassement, on passe à un type d'empilement plus serré tendant vers le type tétragonal sphéroïdal de porosité 30,19 p. 100.

En ce qui concerne les autres populations de sables de formes complexes, il est bien difficile d'imaginer les types d'assemblage qui peuvent exister, tout au plus peut-on envisager, à l'opposé des « Billes », le cas des lamelles de micas des « Maures »

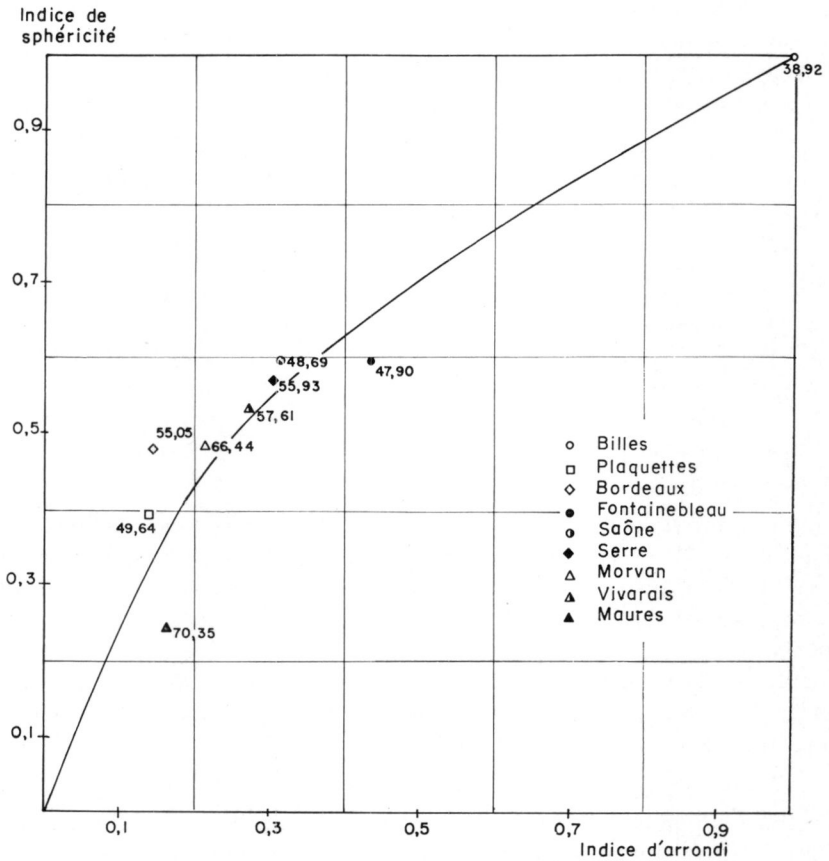



FIG. 11. — *Relations entre la forme des particules et la porosité sans tassement P* (en p. 100)

qui réalisent vraisemblablement des empilements de type « château de cartes » en ménageant une porosité très élevée comme nous l'avons constaté précédemment.

2. *Forme des vides.*

Ainsi que l'indique GRAS (1969), la configuration de l'espace poral est telle, qu'il est en général difficile de lui attribuer des formes géométriques simples (cylindre, tronc de cône...). Même dans le cas des billes sphériques, les pores sont limités par des portions de surface sphérique dont on connaît la courbure mais il est très difficile d'en faire une représentation géométrique simple. A plus forte raison lorsqu'il s'agit de particules de formes variées et complexes, il ne nous sera pas possible d'imaginer les formes réelles des pores, qui doivent être d'ailleurs fort diverses.

3. *Dimensions des vides.*

En fait, il ne nous est pas possible d'obtenir les dimensions linéaires des pores, mais seulement de calculer, en faisant le quotient du volume global des vides par la densité de population, ce que nous appelons la porosité élémentaire, c'est-à-dire

le volume de vide correspondant à une particule qui, dans le cas des « Billes » représente effectivement le volume moyen d'un pore, mais dans les autres cas, avec des formes complexes peut être très différent.

Les résultats sont les suivants :

| | Porosité spécifique (en $mm^3$ par g) | Porosité élémentaire (en $\mu^3$ par grain) |
|---|---|---|
| Billes | 242,288 | $1\,218 \times 10^3$ |
| Plaquettes | 397,288 | $1\,676 \times 10^3$ |
| Bordeaux | 458,392 | $1\,169 \times 10^3$ |
| Fontainebleau | 347,572 | $1\,746 \times 10^3$ |
| Saône | 359,849 | $1\,554 \times 10^3$ |
| Serre | 485,294 | $1\,519 \times 10^3$ |
| Morvan | 576,860 | $1\,360 \times 10^3$ |
| Vivarais | 508,037 | $1\,378 \times 10^3$ |
| Maures | 855,303 | $1\,148 \times 10^3$ |

Nous constatons que cette porosité élémentaire varie peu en fonction des types de sables, c'est-à-dire, pour prendre un exemple, que si nous empilons au hasard 100 billes et 100 plaquettes de micas, tamisées entre 100 et 160 $\mu$, nous obtiendrons une porosité globale pratiquement équivalente. Par contre, la forme des vides sera fort différente.

D'autre part, on peut affirmer que les différences importantes que nous avons constatées dans les porosités, exprimées en pourcentage volumique, sont dues essentiellement aux différences dans le nombre des particules.

*Rayon hydraulique moyen.*

Une autre approche de l'aspect dimensionnel des pores peut être envisagée en calculant le rayon hydraulique moyen pour chacune des populations, tel qu'il a été défini précédemment, dans l'application de la loi de Poiseuille :

$$r_m = k \frac{\text{volume des capillaires}}{\text{surface de la paroi des capillaires}}$$

soit, par extension à un matériau poreux en général :

$$r_m = k \frac{\text{porosité spécifique}}{\text{surface spécifique}}$$

En prenant $k = 5$, on obtient pour l'ensemble des populations :

| | $r_m$ en $\mu$ |
|---|---|
| Billes | 96,15 |
| Plaquettes | 97,45 |
| Bordeaux | 88,25 |
| Fontainebleau | 88,45 |
| Saône | 83,10 |
| Serre | 74,50 |
| Morvan | 62,55 |
| Vivarais | 58,30 |
| Maures | 77,60 |

Il ressort de ces valeurs calculées du rayon hydraulique moyen que celui-ci est élevé pour les populations à formes arrondies (Billes, Fontainebleau, Saône) et également pour les sables anguleux artificiels (Plaquettes, Bordeaux). Au contraire, il diminue de plus en plus quand les formes deviennent plus anguleuses et que le pourcentage de micas croît (Serre, Morvan, Vivarais). La valeur 77,6 $\mu$ attribuée à « Maures » est à notre avis anormalement élevée et justifie, ici encore, l'emploi d'une valeur plus faible pour le coefficient $k$.

On obtient, par exemple $r_m = 46{,}56\ \mu$ avec $k = 3$. Il est vraisemblable également qu'une valeur de $k$ inférieure à 5 conviendrait mieux dans le cas des formes très anguleuses « Plaquettes » et « Bordeaux ».

Notons que la valeur de ce rayon hydraulique moyen est d'autant plus significative que la porosité est plus homogène.

## E. — CONCLUSION

Partant de 9 populations de particules de la taille des sables fins, dont 6 populations de sables naturels d'origine géologique et géographique variées, sélectionnées par tamisage selon la méthode classique de l'analyse granulométrique, nous avons tenté de les caractériser par un certain nombre de techniques de nature très différente.

Le tableau 7 résume de façon synthétique les résultats obtenus.

TABLEAU 7

*Synthèse des résultats*

| Populations | Nature minéralogique | Formes | | Densité de population | Surface spécifique | Porosité |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Billes | verre | sphériques | | faible | très faible | très faible |
| Plaquettes | verre | aplaties et anguleuses | | faible | faible | faible |
| Bordeaux | quartz | anguleuses | | forte | moyenne | moyenne |
| Fontainebleau | quartz | arrondies | | faible | faible | faible |
| Saône | quartz + feldspaths | légèrement arrondies | | faible | faible | faible |
| Serre | quartz + feldspaths | légèrement anguleuses | | moyenne | moyenne | moyenne |
| Morvan | quartz + feldspaths + micas | lamelles 10 % | anguleuses | forte | forte | forte |
| Vivarais | quartz + feldspaths + micas | lamelles 20 % | légèrement arrondies | forte | forte | forte |
| Maures | quartz + feldspaths + micas | lamelles 70 % | | très forte | très forte | très forte |

En fait, il nous est apparu que la *forme des particules élémentaires*, dépendant d'ailleurs de leur nature minéralogique, elle-même liée à leur origine et à leur histoire géologiques, était le *critère de base* qui conditionnait les autres caractères. S'il n'est pas possible de rendre compte directement par une relation, de la nature de ce lien entre la forme et les autres caractères, c'est essentiellement à cause de la difficulté rencontrée pour quantifier un caractère morphologique moyen. Nous avons tenté de le faire en utilisant à l'aide d'une représentation graphique les indices moyens de sphéricité et d'arrondi.

En fonction donc du critère fondamental qu'est la forme des particules, il apparaît que l'on peut distinguer parmi les 9 populations de sables étudiées cinq groupes de comportement :

— Le premier groupe comprend les sables de formes plus ou moins arrondies. Ce sont : « Billes » (forme théorique), « Fontainebleau » et « Saône ». Ce sont tous des sables façonnés, issus de matériaux transportés et caractérisés par une majorité de quartz et feldspaths sans micas. Ils ont une faible densité de population, une faible surface spécifique et une faible porosité.

— Le deuxième groupe renferme une seule population : « Serre ». Il s'agit de sables de formes dominantes légèrement anguleuses issus d'une arène en place, mais préalablement façonnés et sans micas. Les caractéristiques sont toutes moyennes.

— Le troisième groupe comporte : « Morvan » et « Vivarais », c'est-à-dire des sables en place sur matériaux primaires et comprenant en majorité des quartz et feldspaths plus ou moins anguleux avec un pourcentage toujours assez faible de micas. Ils ont une densité de population, une surface spécifique et une porosité fortes.

— Le quatrième groupe renferme une seule population : « Maures », formée d'une majorité de micas, donc issue de roches du type micaschistes et dont le comportement est tout à fait particulier avec des caractéristiques toutes très élevées.

— Le cinquième groupe est uniquement constitué de particules artificielles : « Plaquettes » et « Bordeaux » à formes très anguleuses qu'il n'est pas possible de rencontrer dans la nature. Leurs caractéristiques moyennes, comme celles de « Bordeaux », ou faibles comme celles des « Plaquettes », nous ont posé des problèmes d'interprétation.

Ce classement nous permet d'exprimer un certain nombre de tendances observées dans les comportements des populations étudiées ; celles-ci devraient pouvoir être confirmées en testant d'autres types de sables naturels.

Un autre aspect de cette étude est de montrer l'insuffisance de la méthode par tamisage de l'analyse granulométrique pour caractériser le squelette sableux en vue d'interpréter son comportement dans les sols. Il nous semble qu'une analogie est possible avec la caractérisation granulométrique de l'argile définie au sens agronomique comme la fraction inférieure à 2 $\mu$.

Nous savons qu'il est souvent nécessaire de préciser cette détermination, en particulier en recherchant la nature même des minéraux argileux, si l'on veut connaître par exemple les possibilités d'adsorption ionique ou d'hydratation et de gonflement de cette fraction argileuse.

De même, dans le cas des sables, il n'est pas interdit de penser que l'analyse granulométrique peut aussi être insuffisante pour prévoir et interpréter le compor-

tement physique des sols qui contiennent une certaine proportion de sable et la cartographie pédologique nous a appris qu'ils étaient très nombreux.

Cette insuffisance se manifeste sur deux plans :

— Sur le plan de l'analyse granulométrique, proprement dite, dont les résultats se traduisent par une répartition pondérale de particules par classes de taille. Cette répartition à caractère pondéral est justifiée, d'ailleurs, par le fait que la plupart des minéraux sableux en quantité notable dans les sols, ont une densité voisine de celle du quartz $d = 2{,}65$. Sans doute, y a-t-il quelques exceptions non négligeables de sables ou « pseudo-particules » riches en fer qui ont une densité nettement supérieure, comme par exemple, les schistes des Maures et les concrétions ferrugineuses.

Par contre, cette répartition pondérale, base de l'analyse granulométrique, ne fait absolument pas intervenir la nature minéralogique des sables, ni leur morphologie. Or, nous avons mis nettement en évidence toute l'importance que ces deux facteurs revêtent en conditionnant directement d'autres caractéristiques intrinsèques (densité de population, surface spécifique, porosité) susceptibles d'influer sur les propriétés physiques des sols.

De ce point de vue, la connaissance de l'origine et de l'histoire géologiques des sables pourrait déjà nous permettre de prévoir leur nature minéralogique, leur forme et donc leurs caractéristiques essentielles d'assemblage.

— Sur le plan de la méthode de tamisage qui, ainsi que nous l'avons signalé dans l'introduction, exerce une sélection à deux dimensions alors que les particules sont tridimensionnelles. A cette sélection à deux dimensions s'ajoute d'ailleurs un facteur supplémentaire d'imprécision dû à la forme carrée de la maille qui autorise les particules aplaties peu épaisses à passer selon une diagonale, c'est-à-dire avec une largeur maximale nettement supérieure à l'ouverture du tamis.

En définitive, cette insuffisance, qui concerne à la fois le principe de l'analyse granulométrique et de la méthode par tamisage, a pour conséquences globales une sélection de matériaux qui présentent en tant que squelette minéral des caractéristiques diverses.

Dans la seconde partie, nous serons amenés à étudier les conséquences de ces caractéristiques intrinsèques des sables sur le comportement physique de sols expérimentaux constitués par des mélanges binaires d'argile et de sables.

*Reçu pour publication en avril 1971.*

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer tous nos remerciements à MM. G. Monnier et J.-C. Fiès du Laboratoire des Sols de l'I. N. R. A. à Versailles qui nous ont guidés et conseillés au cours de la réalisation de ce travail ainsi qu'à M. Seddoh de la Faculté des Sciences de Dijon, qui a effectué la détermination des minéraux lourds.

## SUMMARY

### AN ATTEMPT TO CHARACTERIZE SANDS BY CONSIDERING THEM AS MINERAL SOIL SKELETONS

The analysis of particle-size distribution through screening permits the classification of sands by grain-size, while neglecting their mineralogical composition and physical form.

The aim of the present study was to enlist the aid of various techniques to analyze the

100 to 160 μ particle-size fraction, comprising, on the one hand, particles of simple geometrical shape (spheres, plates), and on the other, natural sands of varying origin and mineralogical composition. The latter included transported sands of marine, dunal and fluvial origin, and sedentary sands derived from granite, sandstone, or interbedded with mica schist. The techniques employed were mineralogical analysis, morphoscopy and morphometry, statistical counts of screen fractions, surface measurement by permeametric analysis, and porosity measurements.

The evidence showed that the shapes of elementary particles, which depend on mineralogical composition, constitute the basic criteria determining all other characteristics. These basic shapes were defined in terms of sphericity and roundness.

On the basis of this evidence, it was possible to distinguish five patterns of behaviour among the nine sand fractions under study, as follows :

1. Round-grained sand, formed from transported materials, having low fractional density, specific surface and porosity.
2. Slightly angular grains, formed from mica-free disintegrated sandstone, having average characteristics.
3. Sand formed from primitive materials, containing some mica, having high fractional density, specific surface and porosity.
4. Sand derived from mica schist, containing a high proportion of mica, behaving in an unusual manner, and having high fractional density, specific surface and porosity.
5. Very angular artificial particles having average characteristics.

A subsequent report will deal with the influence of particle shape on the physical properties of experimental soils made up from these sand fractions.

## ZUSAMMENFASSUNG

### VERSUCHE EINER CHARAKTERISIERUNG DER SANDE IN BEZUG AUF DIE BILDUNG DER MINERALISCHEN BODENSTRUKTUR

Die Technik der Körnchengrössenbestimmung durch Sieben erlaubt die Sande nach Grössenklassen zu ordnen ohne Berücksichtigung ihrer mineralogischen Natur oder Form.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, mit Hilfe verschiedener Techniken zwischen 100 und 160 μ gesiebte Sandzusammensetzungen zu charakterisieren, welche einerseits Teilchen theoretischer Prägung (Kugelschen, kleine Platten) und anderseits natürliche Sande geologischer Beschaffenheit enthalten. Unter letzteren handelt es sich um versetzte Sande aus See-, Dünen- oder Flussherkunft und um an Ort und Stelle gebliebene Sande aus granitartigen, sandsteinartigen oder auf Glimmerschiefer liegenden Sandformationen. Die angewandten Techniken sind die mineralogische Analyse, die Morphoskopie und die Morphometrie, die statistische Auszählung der Bestände, die Messung der Oberflächen mittels Permeametrie und die Messung der Porosität.

Es wurde festgestellt, dass die Form der elementaren Teilchen, welche übrigens von ihrer mineralogischen Beschaffenheit abhängig ist, das Haupt Kriterium darstellt, das alle anderen Eigenschaften bedingt. Diese Form wurde durch Mittelwerte der sphärischen und Abrundungs-Unterscheidungszeichen bestimmt.

In Abhängigkeit von diesem Haupt-Formkriterium konnte man unter den neun untersuchten Sandbeständen fünf Gruppen je nach ihrem Verhalten unterscheiden :

— Sande abgerundeter Form, die aus verlagerten Materialien herkommen und die sich durch eine schwache Dichte der Bestände, eine geringe spezifische Oberfläche und eine schwache Porosität auszeichnen ;
— Sande etwas kantiger Form, die aus sandsteinartigen Sandformationen ohne Glimmer herkommen. Sie weisen mittlere Charakteristiken auf ;
— Sand aus Sandformationen auf primären Materialien mit einem gewissen Glimmerprozentsatz, die eine bedeutende Dichte der Bestände, eine umfangreiche Oberfläche und eine starke Porosität aufweisen ;
— Sande, die aus Glimmerschiefer mit einem bedeutenden Anteil an Glimmer herkommen. Ihr Verhalten ist sehr speziell mit sehr bedeutenden Charakteristiken ;
— Sehr kantige, künstliche Teilchen mit mittleren Charakteristiken.

In einem nächsten Aufsatz wird der Zusammenhang zwischen der Form der Teilchen und der physikalischen Eigenschaften der aus diesen Sandbeständen wiederhergestellten experimentalen Böden untersucht.

## РЕЗЮМЕ

Опыт охарактеризования песков в их роли минерального скелета почвы.

Ж. КРЕТИЕН.

Применение техники анализа с помощью просеивания дает возможность классификации песков по признаку размеров гранул, без принятия во внимание их минералогической природы или формы.

Цель данной работы заключается в попытке охарактеризовать при помощи различных технических приемов, с одной стороны, почвы просеянные через сито от 100 до 160 и заключающие частички разных геометрических форм (шарики, пластинки), а с другой, — природные пески геологического происхождения и разной минералогической природы : наносные пески морского, дюнного, или речного происхождения, неподвижные пески происходящие от коры выветривания гранитов, песчаников и слюдяных сланцев. Применялись следующие технические приемы : минералогический анализ, морфоскопия и морфометрия, статистический учет групп, измерения площадей при помощи пермеаметрии, измерения порозности.

Выяснилось что форма элементарных частичек, зависящая, между прочим, от их минералогической природы, является основным критерием обуславливающим все остальные характеры. Форма эта определялась с помощью средних показателей сферичности и округлости.

В 9-ти группах изученных песков и в зависимости от этого основного критерия, отличалось 5 разделений :

— Пески округлой формы наносного проихосждения со слабым групповым составом, малой удельной поверхностью и слабой порозностью;

— Пески слегка угловатой формы, происходящие от коры выветривания песчанников, не содержащие слюды. Эти пески характеризуются средними показателями.

— Пески выветривания расположенные на первичных материалах, содержащие некоторое количество слюды, пески сильного группового состава, с крупной удельной поверхностью и сильной порозностью;

— Пески происходящие от слюдяных сланцев, содержащие сильную пропорцию слюды. Их поведение совершенно особое и характеризуются они крупными показателями;

— Искуственные, сильно угловатые частички, характеризующиеся средними показателями.

Следующая работа будет посвящена влиянию форм частичек на физические свойства экспериментальных почв, воспроизведенных на базе песков принадлежащих к разным группам.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BENAVIDEZ R., 1971. Thèse de 3e cycle, Fac. Sci. Paris.

CAILLEUX A., TRICART J., 1963. *Initiation à l'étude des sables et des galets*, t. 1, 369 p., C. D. U., Paris.

CHAUVEL A., MONNIER G., 1967. Sur la signification générale de l'analyse granulométrique en Pédologie ; examen des problèmes posés par la caractérisation de la texture de certains sols tropicaux. *C. R. Acad. Sci.*, **264**, 1969-1972.

CHAUVEL A., PEDRO G., 1967. Considération sur l'analyse granulométrique et le problème de la détermination de la constitution minéralogique élémentaire de certains sols tropicaux ; nécessité et limites de la déferrification. *C. R. Acad. Sci.*, **264**, 2089-2092.

DEJOU J., 1966. Le massif de granite à 2 micas de la Pierre-qui-Vire (Yonne et Nièvre). Étude pétrographique de ses différents faciès. *Ann. agron.*, **17** (2), 99-141.

DUCHAUFOUR P., 1965. *Précis de Pédologie*, 2e éd., Masson, Paris, 433-434.

FIÈS J. C., 1970. Communication personnelle.

GRAS R., 1969. Considérations sur la porosité et l'étude des milieux poreux. *Sci. Sol*, **2**, 79-91.

HÉNIN S., FÉODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol.* Soc. d'Éd. des Ing. Agric., Paris, 320 p.

ROUQUEROL F., 1968. *Texture des solides poreux ou divisés.* Techniques de l'Ingénieur, Mesures et Analyses, p. 3645, 1-14.

VATAN A., 1967. *Manuel de Sédimentologie.* Éditions Technip, Paris, 395 p.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (6), 655-685.

# RECHERCHE D'UNE INTERPRÉTATION TEXTURALE DE LA POROSITÉ DES SOLS

J.-C. FIÈS
avec la collaboration technique de C. JEANDET

*Station centrale d'Agronomie,*
*Laboratoire des Sols,*
*Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,*
*78 - Versailles*

## RÉSUMÉ

L'étude des relations entre la porosité totale des sols et leur texture est abordée au niveau de l'assemblage élémentaire entre les constituants, à l'aide de modèles constitués par des mélanges binaires d'argile et de squelette.

Les squelettes utilisés sont choisis parmi les limons et les sables. Ils sont associés en proportions variées à trois types d'argiles minéralogiques : une kaolinite, une montmorillonite et un mélange illite-kaolinite-montmorillonite. Les mélanges sont réalisés selon un protocole permettant d'obtenir des échantillons à structure continue.

Les valeurs des porosités totales mesurées sur les différents échantillons sont comparées à celles calculées à l'aide d'un modèle théorique d'arrangement. Cette comparaison permet de mettre en évidence la perturbation de l'arrangement des particules du squelette, dès l'introduction de la phase argileuse. L'interprétation physique de cet effet de perturbation nous conduit à proposer, sur la base de déterminations de la densité apparente de la phase argileuse et de la surface spécifique du squelette, un arrangement élémentaire équivalent.

Dans cet arrangement, l'argile présente participe à l'enrobage des particules du squelette (argile chlamydomorphe) et au remplissage des lacunes interparticulaires (argile intertextique). Défini pour des échantillons secs, cet arrangement est transposable aux échantillons saturés en eau. La détermination du gonflement de l'argile pure permet alors de prévoir les valeurs des paramètres définissant l'arrangement du squelette (porosité matricielle) et le taux d'occupation par l'argile de l'espace existant entre les particules du squelette.

## INTRODUCTION

Les propriétés physiques des sols dépendent étroitement de la distribution dimensionnelle des particules qui les constituent, mais on constate qu'il est très difficile de prévoir ces propriétés à partir des données de l'analyse granulométrique. Pour traduire l'existence de ces relations complexes on parle d'« effet texture ». Cette expression signifie que si chaque classe granulométrique de constituants présente bien un ensemble de propriétés spécifiques, leur action résultante n'est pas la somme pondérée de leur action particulière.

Il apparaît maintenant nécessaire de préciser ce que l'on entend par « effet

texture » en recherchant les mécanismes susceptibles d'intervenir au niveau des interactions entre constituants. Cette démarche s'appuie nécessairement sur les procédés propres à la méthode expérimentale, qui peut seule nous permettre de dégager tout d'abord des paramètres intervenant dans les interactions, ensuite des relations explicatives, qui permettront par la suite d'aborder la prévision des propriétés physiques elles-mêmes.

Dans cette optique, nous envisagerons ici une propriété physique très globale des sols, qui procède en grande partie de leur composition granulométrique et dont dépendent en particulier tous les échanges d'eau, d'air et de chaleur : la porosité des sols.

Nous nous situerons, dans un but de simplification, dans le domaine des structures continues, où les matériaux étudiés ne présentent pas de discontinuité majeure.

Au cours d'une étude récente (1970), nous avons présenté (en collaboration avec HÉNIN et MONNIER) un modèle théorique permettant de rattacher la porosité d'un échantillon à certaines caractéristiques de sa granulométrie. Dans le cas des mélanges binaires de particules, ce modèle permet de calculer, pour chaque proportion, la valeur correspondante de la porosité totale et de déterminer la teneur en chaque constituant permettant de réaliser une porosité minimale avec des particules données. La seule hypothèse admise au départ dans ce calcul consiste à poser qu'au cours du mélange, l'arrangement respectif des particules de chaque constituant reste inchangé, cet arrangement étant caractérisé par la porosité déterminée sur chaque constituant pris isolément.

Confronté à des résultats expérimentaux, obtenus d'une part sur des mélanges binaires de billes de verre, d'autre part sur le mélange d'une pâte argileuse kaolinitique à un limon fin, le modèle théorique conduit notamment à prévoir des valeurs de porosité minimale qui peuvent être très inférieures à celles effectivement observées.

Ce fait, de caractère apparemment très général puisqu'il est constaté même dans le cas où l'un des constituants est composé de particules inférieures à deux microns, signifie qu'au fur et à mesure que le massif tend à devenir de plus en plus compact, l'arrangement des constituants se modifie en devenant moins serré que ne l'était l'arrangement initial.

Cet effet perturbateur peut être exprimé en introduisant dans la formule correspondant au modèle un coefficient de perturbation. S'il permet l'ajustement des valeurs théoriques aux valeurs observées, ce coefficient a par ailleurs une signification physique en tant que paramètre caractérisant un effet texture.

L'objet du présent travail est de préciser cette signification physique et d'en tirer les conséquences.

## I. — MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODE D'ÉTUDE

Pour aborder ce problème, nous avons choisi une méthode qui consiste à étudier des échantillons artificiellement constitués à partir de différents squelettes granulométriques et de différentes argiles minéralogiques, l'ensemble de ces matériaux provenant de sols ou de gisements naturels.

## A. — *Matériel expérimental*

1. *Les squelettes.*

Les particules constitutives des différents squelettes utilisés appartiennent d'une part aux limons, d'autre part aux sables.

Les premières ont été séparées et extraites par sédimentations successives, après dispersion par la méthode internationale, d'un matériau limono-argileux prélevé dans l'horizon d'accumulation d'un sol de Versailles. Les secondes sont obtenues par tamisage de sables de carrière appartenant au faciès des sables de Fontainebleau.

En plus de l'étalement granulométrique, il a été défini pour chaque squelette un diamètre équivalent et la porosité totale mesurée dans des conditions qui permettent de la définir comme une caractéristique intrinsèque du matériau considéré.

Le diamètre équivalent dérive directement d'une estimation de la surface spécifique des particules par la mesure de la perméabilité à l'air ou à l'eau et rend compte globalement de la distribution dimensionnelle des particules au sein de la famille granulométrique étudiée (FIÈS, 1970).

La porosité totale a été déterminée au cours des mesures de perméabilité à l'eau, après malaxage du matériau humide suivi d'une mise en place de la charge d'eau.

Ceci nous permet d'une part de réaliser un massif poreux dans des conditions très proches de celles qui président à la réalisation des échantillons, que nous allons considérer plus loin, d'autre part de définir une porosité totale caractéristique, puisque ne dépendant que de la distribution, de la taille et de la forme des particules.

Enfin, la densité réelle de chacun des matériaux retenus a été déterminée à l'aide du pycnomètre à air. Ces données sont réunies sur le tableau 1.

TABLEAU I

*Caractéristiques des différents squelettes*

| Classe | Porosité totale (%) | Densité réelle | Surface spécifique ($cm^2/g$) | Diamètre équivalent ($\mu$) | Constitution minéralogique | Origine |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2-10 $\mu$ | 42 | 2,77 | 5.850 | 3,7 | Quartz, traces de feldspaths et muscovite | Horizon d'accumulation du sol de limon de Versailles |
| 2-20 $\mu$ | 46,5 | 2,70 | 3.700 | 6 | — | — |
| 10-20 $\mu$ | 48,5 | 2,67 | 1.755 | 12,6 | — | — |
| 2-50 $\mu$ | 43 | 2,70 | 1.743 | 12,8 | — | — |
| 20-50 $\mu$ | 49 | 2,70 | 1.090 | 20,4 | Quartz essentiellement | — |
| 100-200 $\mu$ | 42 | 2,67 | 225 | 100 | — | Sable de Fontainebleau |
| 200-500 $\mu$ | 36,3 | 2,67 | — | — | — | — |

2. *Les argiles.*

Trois matériaux argileux ont été utilisés. Ils correspondent dans chaque cas, à la fraction inférieure à 2 microns, recueillie et floculée par du chlorure de calcium. Rendue monoionique $Ca^{++}$ par échange avec $CaCl_2$ 0,2 N, lavée et centrifugée, cette fraction a été utilisée sous cette forme pour la fabrication des échantillons artificiels. Une première fraction (HB), a été extraite de l'horizon d'accumulation d'un sol de Versailles : l'analyse aux rayons X révèle la présence de

montmorillonite, d'illite et de traces de kaolinite. La capacité d'échange de 52 méq. pour 100 g d'argile sèche suggère que la montmorillonite représente une part importante du matériau argileux.

Les deux autres fractions utilisées, extraites d'argile de gisement, correspondent respectivement à une montmorillonite (M) et à une kaolinite (K). Cette dernière présente vraisemblablement une granulométrie assez grossière, car sa cohésion appréciée à sec après malaxage est très faible, et son diamètre équivalent, déterminé après une mesure de perméabilité à l'air, est voisin de 0,8 microns.

Sur chacune de ces fractions, les densités réelles ont été mesurées au pycnomètre à eau. Cette seconde technique de détermination de la densité réelle, bien que plus longue et délicate que celle précédemment utilisée pour les particules grossières, s'impose dans le cas de fractions susceptibles de présenter une certaine hygroscopicité qui fausse alors les résultats des mesures faites au pycnomètre à air.

L'ensemble des données obtenues sur ces trois fractions argileuses est présenté sur le tableau 2.

TABLEAU 2

*Caractéristiques des fractions argileuses inférieures à 2 microns*

| Désignation | Constitution minéralogique (RX) | Cation | Densité réelle | Origine du matériau d'extraction | CE méq. pour 100 g d'argile séchée à 105°C |
|---|---|---|---|---|---|
| HB | Montmorillonite<br>Illite<br>Kaolinite (tr) | $Ca^{++}$ | 2,809 | Horizon d'accumulation du sol de limon de Versailles | 52,5 |
| M | Montmorillonite | $Ca^{++}$ | 2,300 | Gisement | 80,4 |
| K | Kaolinite | $Ca^{++}$ | 2,646 | Gisement | 6,1 |

B. — *Méthode d'étude*

1. *Préparation des échantillons.*

A partir de ces différents matériaux, nous avons réalisé des séries de mélanges binaires, chacun étant constitué d'une fraction argileuse associée à une famille granulométrique donnée. Au sein de chaque série, la teneur pondérale en argile varie entre 0 et 100 p. 100.

Pour simplifier l'interprétation ultérieure des mesures de porosité, nous avons cherché à réaliser des échantillons présentant une structure continue. Aussi, avons-nous retenu le protocole de préparation d'échantillons artificiels déjà mis au point par KHEYRABI et MONNIER (1968).

Ce protocole se caractérise par le fait que le mélange entre l'argile et les particules associées est effectué à *l'état humide*, dans des conditions définies de teneur en eau, de malaxage et de séchage.

On verra ultérieurement que les échantillons résultant de tels mélanges présentent à l'état macroscopique une grande homogénéité.

2. *Séries réalisées.*

Afin de pouvoir juger, d'une part de l'influence liée au type de squelette associé à l'argile, d'autre part de l'influence de la nature minéralogique de l'argile, les séries suivantes ont été réalisées :

argile HB, squelettes : 2- 20 μ
argile HB, squelettes : 2- 10 μ
argile HB, squelettes : 2- 50 μ
argile HB, squelettes : 20- 50 μ
argile HB, squelettes : 100- 200 μ

Mais on a pu constater sur le tableau 1, que les porosités totales de ces squelettes simples sont peu différentes les unes des autres. Pour pouvoir tenir compte de ce paramètre, nous avons joint à cette série un squelette complexe constitué de 80 p. 100 de 200-500 μ et de 20 p. 100 de 2-10 μ. Le squelette complexe présente une porosité totale de 27 p. 100, bien inférieure aux porosités totales des squelettes simples.

3. *Traitements.*

Afin d'élargir le cadre de nos observations et tenter de cerner l'ensemble des cas possibles, nous avons déterminé la porosité totale des échantillons placés à deux états extrêmes d'hydratation. Les échantillons réalisés selon le protocole retenu ont tous été séchés à l'étuve à une température de 105°C. Sur ces échantillons, des mesures ont permis de déterminer les données nécessaires au calcul de leur porosité totale à l'état sec : $P_S$.

Par ailleurs, certains d'entre eux ont été réhumectés par l'eau jusqu'à saturation et l'on a alors déterminé leur porosité à l'état humide : $P_H$.

La technique de réhumectation retenue ici est la suivante : les échantillons séchés sont placés sur une plaque poreuse dont la partie inférieure est au contact avec de l'eau libre préalablement dégazée ; l'ensemble est placé dans une enceinte où l'on abaisse la pression jusqu'à atteindre la valeur de la pression de vapeur d'eau saturante à la température du laboratoire.

Au cours de cette réhumectation sous vide, les échantillons ne sont soumis à aucune contrainte mécanique et le gonflement s'effectue librement.

Les séries ainsi traitées sont les suivantes :

argile HB, squelette : 2-20 μ
argile HB, squelette : 2-50 μ
argile M, squelette : 2-20 μ
argile K, squelette : 2-20 μ

4. *Détermination du volume apparent des échantillons.*

Afin de pouvoir calculer la porosité totale présentée par chaque échantillon tant sec qu'humide, il est nécessaire de déterminer, outre son poids, son volume apparent.

Nous avons utilisé pour cela une technique similaire à celle présentée par MAERTENS (1965). La détermination du volume apparent est effectuée en plongeant, dans un bécher rempli d'eau placé sur une balance, l'échantillon préalablement imperméabilisé à l'aide d'un vernis (1).

On apprécie sur la balance la poussée d'Archimède correspondant au volume d'eau déplacé : le volume apparent de l'échantillon est alors directement mesuré.

Une série de répétitions conduites sur des échantillons constitués selon le protocole déjà défini, a montré que l'erreur relative sur la densité apparente calculée à partir de cette mesure, était inférieure à 0,5 p. 100 avec un écart type de l'ordre de 1 p. 100. Outre la précision des mesures, déjà indiquée par MAERTENS, l'écart type réduit montre la grande homogénéité des échantillons appartenant à un même mélange et confirme la validité du protocole de préparation retenu.

## II. — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

### A. — *Densité apparente*

Avant d'aborder les résultats concernant les porosités totales observées et la mise en évidence d'un effet perturbateur dans les séries étudiées, il nous est apparu utile de présenter les données brutes concernant les densités apparentes des échantillons, calculées après les mesures de leurs poids et de leurs volumes.

Ces données sont couramment utilisées dans la caractérisation de l'état d'un sol et l'ensemble de nos résultats, concernant un grand nombre de textures, pourrait ultérieurement faciliter un certain nombre de comparaisons. Suivant le traitement des échantillons, nous avons pu calculer d'une part des densités apparentes sèches, d'autre part des densités apparentes humides.

(1) Éthyl méthylcétone + 20 p. 100 de Saran-Resin F 310 (Dow Chemical Co).

La densité apparente sèche $d_s$ est définie par le rapport du poids de l'échantillon à son volume, ces données étant déterminées après séchage de l'échantillon à 105°C.

La densité apparente humide $d_h$ est définie par le rapport du poids de l'échantillon séché à 105°C, à son volume déterminé après saturation en eau.

Ces données sont regroupées sur les tableaux 3 et 4. A partir de ces données et des caractéristiques des différents constituants, on a pu calculer les porosités totales présentées par les échantillons.

### B. — *Porosités totales observées*

La densité réelle de l'argile et celle du squelette associé étant respectivement représenté par $d_a$ et $d_g$, les proportions pondérales d'argile et de squelette dans l'échantillon correspondant respectivement à A et G, on définit pour l'échantillon une porosité totale à l'état sec $P_S$ et une porosité totale à l'état humide $P_H$, à l'aide des équations suivantes :

$$P_S = 1 - d_s \left(\frac{A}{d_a} + \frac{G}{d_g}\right)$$

$$P_H = 1 - d_h \left(\frac{A}{d_a} + \frac{G}{d_g}\right)$$

Les différentes valeurs observées pour les porosités $P_S$ et $P_H$ exprimées en p. 100, sont présentées sur les tableaux 5 et 6 en fonction de la teneur pondérale en argile.

Un exemple graphique, concernant la série HB, 2-50 $\mu$ est donné par ailleurs sur la figure 2. Sur le tableau 6, les valeurs mesurées de l'humidité, exprimées en humidité volumique ont été également portées. On peut constater qu'elles diffèrent peu des valeurs des porosités totales correspondantes, ce qui confirme qu'en moyenne, les différents échantillons ont été réhumectés jusqu'à la saturation.

L'ensemble de ces résultats appelle quelques remarques quand on les considère du point de vue de la diminution de la valeur de la porosité totale qui est généralement réalisée dans les matériaux meubles lors du mélange de deux populations de tailles différentes.

1. *Porosité totale à l'état sec.*

En ce qui concerne les valeurs de $P_S$, on peut constater globalement qu'un abaissement de porosité totale est effectivement observé dans les mélanges (voir aussi fig. 2). Pour une certaine teneur en argile, variant entre 40 et 70 p. 100 selon les séries, il existe un mélange conduisant à la porosité minimale pour la série considérée.

Cependant, cette remarque souffre des exceptions. Ainsi, dans la série HB — squelette complexe (200-500 $\mu$ + 20 p. 100 2-10 $\mu$) la porosité croît au fur et à mesure que la teneur en argile augmente.

Par ailleurs, la porosité minimale est observée dès la teneur en argile de 20 p. 100 dans la série K, 2-20 $\mu$. Quant à la valeur absolue des porosités totales observées sur les différents échantillons, elle semble dépendre en première approximation des valeurs des porosités totales initiales de chaque constituant. Ainsi, dans les séries où l'argile HB est utilisée, les différences de porosité sont bien plus marquées entre

TABLEAU 3

*Densité apparente sèche des échantillons*

| Nature | Argile (%) | | | | | | | | | | | | | | Squelettes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 (*) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| HB | 1,967 | 1,975 | 1,912 | 1,835 | 1,849 | — | 1,849 | 1,840 | — | — | 1,830 | — | — | 1,665 | 500-200 μ + 20 % 2-10 μ |
| | 1,550 | 1,557 | 1,548 | 1,570 | 1,578 | 1,518 | — | 1,735 | — | — | 1,785 | — | — | 1,665 | 100-200 μ |
| | 1,376 | 1,450 | 1,500 | 1,575 | 1,550 | 1,590 | 1,625 | 1,770 | 1,785 | 1,815 | 1,768 | — | — | 1,665 | 20-50 μ |
| | 1,535 | 1,600 | 1,648 | 1,635 | 1,662 | 1,708 | 1,739 | 1,755 | 1,802 | 1,802 | 1,759 | 1,726 | 1,699 | 1,665 | 2-50 μ |
| | 1,375 | 1,483 | 1,509 | 1,585 | 1,610 | — | — | 1,818 | — | — | 1,849 | — | — | 1,665 | 10-20 μ |
| | 1,445 | — | 1,536 | — | 1,565 | — | 1,640 | 1,735 | 1,795 | 1,780 | 1,810 | 1,725 | 1,745 | 1,665 | 2-20 μ |
| M | 1,445 | — | 1,380 | — | 1,450 | — | 1,630 | 1,790 | — | — | 1,715 | — | — | 1,625 | 2-20 μ |
| K | 1,445 | — | 1,670 | — | 1,740 | — | 1,710 | 1,645 | 1,560 | 1,500 | 1,420 | 1,365 | 1,310 | 1,255 | 2-20 μ |

(*) Il s'agit de densités apparentes appréciées sur les massifs de squelettes saturés en eau : les sables et limons ne présentant ni gonflement ni retrait, ces valeurs des densités apparentes sont donc égales à celles des densités apparentes à l'état sec.

TABLEAU 4

*Densité apparente humide des échantillons saturés en eau*

| Nature | Argile (%) | | | | | | | | | | | Squelettes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| HB | 1,535 | 1,549 | 1,440 | 1,476 | 1,464 | 1,405 | 1,326 | 1,234 | 1,180 | 1,116 | 1,021 | 2-50 μ |
| | 1,445 | 1,560 | 1,418 | 1,483 | 1,475 | 1,465 | 1,370 | 1,283 | 1,250 | 1,100 | 1,021 | 2-20 μ |
| M | 1,445 | 1,138 | 1,112 | 1,046 | 1,111 | 1,000 | 0,922 | 0,857 | 0,778 | 0,714 | 0,643 | 2-20 μ |
| K | 1,445 | 1,571 | 1,671 | 1,600 | 1,525 | 1,420 | 1,370 | 1,262 | 1,202 | 1,138 | 1,070 | 2-20 μ |

TABLEAU 5

*Porosité totale à l'état sec, en p. 100*

| Nature | Argile (%) | | | | | | | | | | | | | | Squelettes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| HB | 27 | 27,9 | 29,3 | 32,5 | 32,2 | — | 32,4 | 33 | — | — | 34,2 | — | — | 40,7 | 200-500 µ + 20 % 2-10 µ |
| | 42 | 41,7 | 42,2 | 41,7 | 41,6 | 43,8 | — | 36,3 | — | — | 35,7 | — | — | 40,7 | 100-200 µ |
| | 49 | 46,3 | 44,6 | 42,1 | 43,1 | 41,6 | 40,6 | 35,6 | 35,3 | 34,5 | 36,4 | — | — | 40,7 | 20-50 µ |
| | 43 | 40,8 | 39,2 | 37,9 | 39 | 37,3 | 36,3 | 36 | 34,6 | 34,9 | 36,6 | 38 | 39,3 | 40,7 | 2-50 µ |
| | 48,5 | 44,7 | 43,7 | 41,2 | 40,4 | — | — | 33,3 | — | — | 33,3 | — | — | 40,7 | 10-20 µ |
| | 46,5 | — | 43,3 | — | 42,6 | — | 40 | 36,8 | 34,9 | 35,7 | 34,9 | 36,1 | 37,7 | 40,7 | 2-20 µ |
| M | 46,5 | — | 48,2 | — | 44,2 | — | 36,5 | 29,3 | — | — | 27,8 | — | — | 29,4 | 2-20 µ |
| K | 46,5 | — | 38,2 | — | 35,3 | | 36,4 | 36,9 | 41,7 | 43,7 | 46,6 | 48,6 | 50,5 | 52,5 | 2-20 µ |

TABLEAU 6

*Porosité totale à l'état humide et humidité volumique, en p 100*

| Nature | Argile (%) | | | | | | | | | | | Squelettes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | |
| HB | 43 | 43 | 47,2 | 47,5 | 46,9 | 49,2 | 52,2 | 55,9 | 58 | 60,4 | 64 | Porosité 2-50 μ |
| | — | 39,9 | 42,9 | 44,2 | 44,1 | 47,5 | 50,4 | 56,7 | 56,3 | 59 | 65,7 | Humidité volumique |
| | 46,5 | 42,6 | 47,8 | 45,8 | 46,4 | 47,3 | 50,4 | 53,9 | 55,8 | 61 | 64 | Porosité 2-20 μ |
| | — | 40,9 | 46 | 44,5 | 44,3 | 48,2 | 49,8 | 52,8 | 59,5 | 61 | 65,7 | Humidité volumique |
| M | 46,5 | 57,2 | 57,3 | 60 | 57,1 | 59,8 | 62,4 | 64,3 | 67,2 | 71 | 72,1 | Porosité 2-20 μ |
| | — | 59,6 | 60,4 | 64,6 | 55,6 | 63,2 | 63,7 | 64,7 | 70 | 73 | 72,6 | Humidité volumique |
| K | 46,5 | 41,9 | 37,3 | 40 | 42,9 | 46,7 | 48,5 | 52,7 | 54,9 | 57,4 | 60 | Porosité 2-20 μ |
| | — | 39,6 | 36,2 | 37,1 | 43,5 | 44,1 | 47,5 | 52,6 | 54 | 55,6 | 58,2 | Humidité volumique |

les séries à squelette simple (du 100-200 μ au 2-20 μ) et la série à squelette complexe dont la porosité initiale du squelette est faible, qu'entre les séries à squelette simple elles-mêmes dont les porosités initiales des squelettes sont peu différentes. Ceci, dans toutes ces séries, pour des teneurs en argile inférieures à 30 p. 100.

Pour des teneurs supérieures, les différences entre les porosités d'une série à l'autre et à même teneur en argile tendent à s'estomper.

Il apparaît ici que la variation de diamètre équivalent des différents squelettes, de 100 μ à 6 μ en valeur absolue, ne semble pas intervenir au niveau de la porosité totale des échantillons.

Enfin, l'utilisation de matériaux argileux différents par leur nature minéralogique se traduit par des différences entre les séries à squelette 2-20 μ auxquelles les trois types d'argiles sont associés.

2. *Porosité totale à l'état humide.*

Les valeurs observées de $P_H$ montrent que seule la série K, 2-20 μ vérifie les remarques générales précédentes, et présente un minimum marqué de porosité, pour une teneur de 20 p. 100 en argile.

Pour les séries HB et M, la tendance générale est à l'accroissement de la porosité en fonction de la teneur en argile.

En valeur absolue, les porosités mesurées ici sont supérieures aux porosités totales des mêmes matériaux secs. Le contraste est d'autant plus marqué que l'on passe d'un matériau peu gonflant (K) à un matériau moyennement gonflant (HB) et très gonflant (M). L'ensemble de ces remarques font déjà ressortir le comportement particulier des mélanges argile-squelette, en ce sens que les mélanges binaires entre matériaux de dimensions très différentes n'aboutissent pas toujours à une diminution de la porosité totale. L'influence du squelette, du moins d'une de ses caractéristiques comme la porosité totale initiale, et l'influence de la nature minéralogique du ciment argileux apparaissent nettement.

Cependant, la signification des valeurs observées pour les porosités totales et leur variation ne peut apparaître clairement qu'en se référant à un modèle théorique dans lequel la disposition relative des particules à la suite d'un mélange obéit à certaines conditions posées *a priori*.

C'est cette démarche que nous allons maintenant effectuer afin de juger de l'effet de perturbation se manifestant au niveau des différentes séries.

3. *Mise en évidence de l'effet perturbation.*

a) *Modèle théorique.*

Rappelons que dans ce modèle on considère deux familles de particules quelconques schématiquement désignées par les termes de « grosses » et « fines ». Le mélange entre « grosses » et « fines » peut s'effectuer en introduisant soit des « fines » dans un massif de « grosses », soit en substituant des « grosses » aux « fines » au sein d'un massif de « fines ».

La seule hypothèse retenue au départ porte sur le fait que la réalisation de ce mélange doit s'effectuer sans perturbation du mode d'arrangement des particules constituant ces massifs. Ce mode d'arrangement est caractérisé par la porosité initiale que présente le massif considéré.

Ainsi, l'introduction de « fines » dans l'espace laissé libre entre les « grosses » s'effectue sans perturber l'arrangement de ces dernières. De même, la substitution de « grosses » aux fines au sein d'un massif de « fines » se traduit par le remplacement d'un volume apparent de « fines » par un volume réel équivalent de « grosses », sans perturbation de la disposition relative des « fines ».

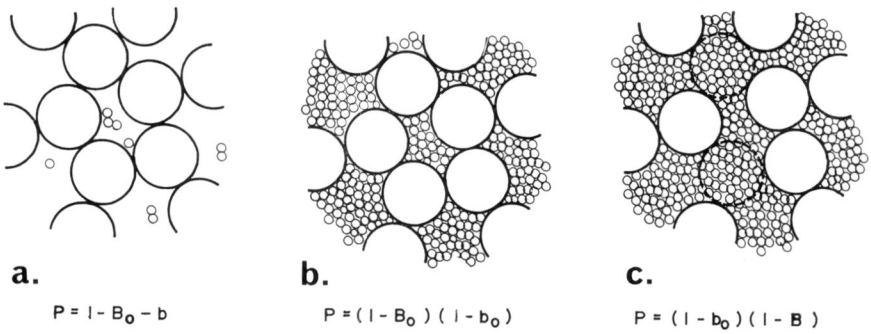



FIG. 1. — *Illustration du modèle théorique d'arrangement des particules : mélange binaire de sphères*

*a* : introduction de « fines » dans un massif de « grosses » sans perturbation de l'arrangement de ces dernières.
*b* : réalisation de la porosité totale minimale : les « fines » forment une phase continue.
*c* : accroissement de la teneur en « fines » par substitution des « grosses ».

On a représenté sur la figure 1 *a* et *c* ces deux types de mélanges, en choisissant arbitrairement des particules de forme sphérique.

Si l'on définit la porosité initiale présentée par un massif de « grosses » par $P_0 = 1 - B_0$, $B_0$ représentant le volume réel de « grosses » occupant un volume apparent égal à l'unité, la porosité totale P d'un mélange de « grosses » avec un volume $b$ de « fines » est défini par l'équation :

$$P = 1 - B_0 - b \qquad (1)$$

A la limite, si $b_0$ représente le volume réel de « fines » qui occupent avec leur porosité initiale caractéristique, un volume égal à l'unité, on ne peut introduire dans le mélange considéré qu'un volume de fines $b$ égal à $b_0$ $(1 - B_0)$. La porosité minimale $P_m$ est alors atteinte (fig. 1 *b*). On a :

$$P_m = (1 - B_0)\ (1 - b_0) \qquad (2)$$

Si nous considérons maintenant l'introduction de « grosses » au sein d'un massif de « fines » dont la porosité initiale $P_0$ est définie par $P_0 = 1 - b_0$, compte tenu de notre hypothèse, un volume B de « grosses » déplace un volume réel de « fines » égal à $B\ b_0$. La porosité totale du mélange est alors définie par l'équation :

$$P = (1 - b_0)\ (1 - B) \qquad (3)$$

On peut remarquer, dans cette dernière expression que le terme $(1 - B)$ représente la *porosité matricielle* des gros éléments, c'est -à-dire la fraction du volume unitaire non occupée par eux. A la limite, B tend vers $B_0$ et nous retrouvons l'équation (2) ; la valeur de la porosité matricielle se confond alors avec celle de la porosité initiale $(1 - B_0)$.

On peut encore remarquer à propos de l'équation (3), que pour les valeurs de

TABLEAU 7

*Comparaison entre les porosités totales à l'état sec, observées et calculées*

| Nature | Argile (%) | | | | | | | | | | | | | Squelettes | ** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | | |
| HB | 100 | 120 | 153 | 220 | 273 * | — | 192 | 149 | — | — | 106 | — | — | 200-500 μ + 20 % 2-10 μ | 18,5 |
| | 100 | 107 | 118 | 129 | 148 | 184 | — * | 171 | — | — | 110 | — | — | 100-200 μ | 31 |
| | 100 | 100 | 103 | 104 | 117 | 127 | 144 | 168 * | 140 | 119 | 113 | — | — | 20-50 μ | 37,5 |
| | 100 | 101 | 106 | 113 | 133 | 150 | 136 * | 170 | 137 | 121 | 113 | 108 | 103 | 2-50 μ | 31,5 |
| | 100 | 97 | 102 | 103 | 111 | — | — | 157 * | — | — | 103 | — | — | 10-20 μ | 37 |
| | 100 | — | 106 | — | 127 | — | 164 * | 182 | — | — | 108 | — | — | 2-20 μ | 35 |
| M | 100 | — | 122 | — | 148 | — | 186 * | 189 | — | — | 113 | — | — | 2-20 μ | 34,5 |
| K | 100 | — | 95 | — | 102 | — | 145 * | 119 | 115 | 109 | 106 | 103 | 101 | 2-20 μ | 28,5 |

* Domaine de teneur en argile correspondant à une porosité minimum $P_m$ calculée.
** Valeur théorique de la teneur en argile nécessaire à la réalisation de $P_m$.

B comprises entre zéro et $B_0$, la phase constituée par les « fines » est une *phase continue*, c'est-à-dire qu'elle occupe, avec une porosité propre identique à la porosité initiale ($1 - b_0$), tout l'espace libre entre les « grosses ».

Au-delà de la valeur limite définie par $P_m$, nous passons au cas de remplissage précédent et la phase continue de « fines » n'est plus réalisée. On a illustré, figure 1, les cas correspondant successivement aux équations (1), (2) et (3), en considérant des particules de forme sphérique.

Les équations (1) et (3) permettent, une fois connues les proportions entre constituants, de définir les porosités totales des mélanges à partir des seules valeurs mesurées des porosités initiales présentées par chaque constituant pris isolément.

b) *Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques.*

On a porté à titre d'exemple sur la figure 2 les résultats concernant les porosités totales observées et calculées pour la série HB, 2-50 μ.

Mais, pour faciliter les comparaisons entre ces deux groupes de données, nous avons exprimé pour l'ensemble des séries, les valeurs observées en fonction des valeurs théoriques calculées, prises chacunes comme base égale à 100.

Les données correspondant aux porosités totales $P_S$ et $P_H$ sont présentées sur les tableaux 7 et 8. Il y apparaît clairement que les porosités totales observées sont supérieures aux porosités totales calculées, et ceci dès l'introduction de 5 ou 10 p. 100 d'argile, selon les squelettes, l'argile utilisée et le traitement considéré.

Ceci est vérifié, à sec, jusqu'à des teneurs en argile supérieures à 70 p. 100, et après réhumectation sous vide, jusqu'à des teneurs supérieures à 50 p. 100.

Les différences extrêmes se manifestent dans les deux conditions d'humidité pour les échantillons présentant des teneurs en argile proches de celles nécessaires à la réalisation théorique des porosités minimales.

Enfin, les teneurs en argiles pour lesquelles on observe une porosité minimale sont très supérieures à celles requises théoriquement. La seule exception à ce dernier point est présentée par la série K, 2-20 μ où ces valeurs sont très proches.

TABLEAU 8

*Comparaison entre les porosités totales à l'état humide, observées et calculées*

| Nature | Argile (%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | Squelettes | ** |
| HB | 100 | 117 | 161 * | 138 | 115 | 106 | 102 | 101 | 99 | 99 | 2-50 μ | 22,5 |
| M | 100 | 105 | 142 * | 133 | 113 | 101 | 98 | 98 | 97 | 100 | 2-20 μ | 24,5 |
| | 100 | 145 | 153 * | 129 | 107 | 103 | 100 | 98 | 99 | 101 | 2-20 μ | 16,5 |
| K | 100 | 104 | 113 * | 128 | 114 | 110 | 102 | 103 | 101 | 100 | 2-20 μ | 25 |

* Domaine de teneur en argile correspondant à une porosité minimum $P_m$ calculée.
** Valeur théorique de la teneur en argile nécessaire à la réalisation de $P_m$.

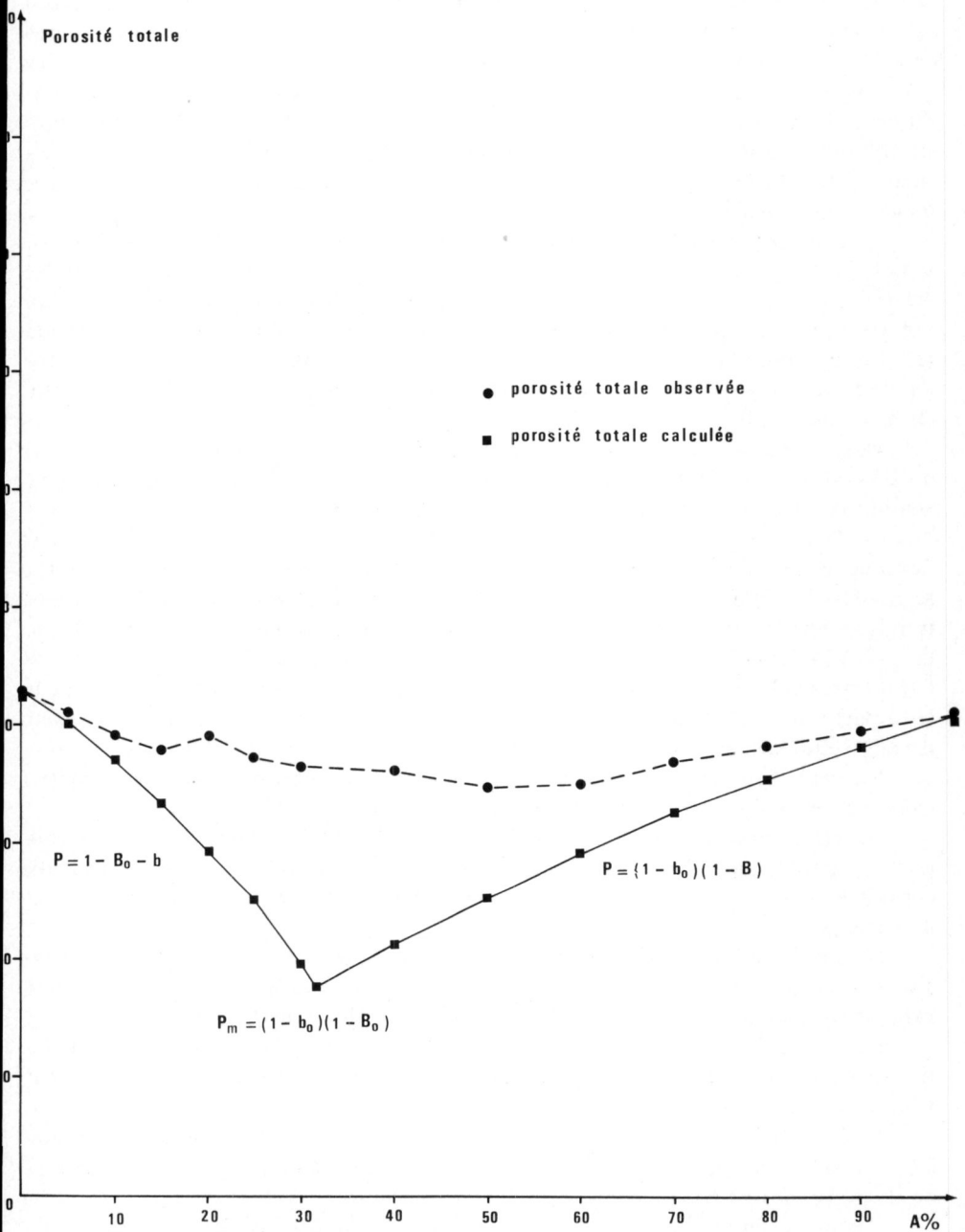



FIG. 2. — *Porosité totale observée et théorique dans la série HB 2-50 μ à l'état sec en fonction de la teneur en argile du mélange*

On ne constate de bonne concordance entre valeurs des porosités totales calculées et observées que pour les échantillons très argileux (plus de 70 p. 100 ou 50 p. 100 selon l'état à l'hydratation) ou dans certains cas, pour les échantillons très pauvres en argile : moins de 5 ou 10 p. 100.

L'ensemble de ces données expérimentales confirme bien le caractère très général de l'effet perturbateur étudié et montre qu'il se manifeste dès les faibles teneurs en argile. Cet effet implique que l'introduction d'argile au sein d'un massif de particules plus grossières, en opposition à l'hypothèse de départ, perturbe l'arrangement de ces dernières.

— En effet, dans le domaine couvert par l'équation (1) où $P = 1 - B_0 - b$, le fait que les porosités observées soient à partir d'un certain taux en argile dans les échantillons, supérieures aux porosités calculées montre que l'introduction d'un volume $b$ d'argile déplace un certain volume de particules du squelette, l'équation (1) prenant alors la forme $P = 1 - B' - b$ où la porosité matricielle représentée par le terme $(1 - B')$ varie au lieu de conserver une valeur constante égale à celle de la porosité initiale $(1 - B_0)$ du squelette.

Dans certains cas, tant à sec (séries HB, 20-50 $\mu$ et 10-20 $\mu$ ; K, 2-20 $\mu$) qu'à l'état humide (séries HB et M, 2-20 $\mu$), l'hypothèse de non perturbation ne semble vérifiée que pour des teneurs en argile inférieures à 10 p. 100.

— Dans le domaine couvert par l'équation (3) $P = (1 - b_0)(1 - B)$, pour des teneurs en argile inférieures aux limites de 70 p. 100 à sec et de 50 p. 100 à l'état saturé, la discordance entre les valeurs observées et calculées des porosités totales implique que le terme en $(1 - B)$ soit remplacé par un terme en $(1 - B')$ tel que $(1 - B') > (1 - B)$.

Cette condition indique que la porosité matricielle reste supérieure à celle calculée à partir de l'hypothèse selon laquelle l'introduction d'un certain volume apparent d'argile remplace un volume réel équivalent de particules du squelette.

On peut observer, sur la figure 3, un exemple de l'évolution des porosités matricielles et calculées concernant la série HB, 2-50 $\mu$.

Un tel résultat est évidemment lié au fait que nous admettons que le terme $(1 - b_0)$ garde une valeur constante, c'est-à-dire que la porosité du matériau argileux considéré, donc sa densité apparente, reste constante quel que soit le mélange auquel il participe.

De fait, il est *a priori* difficile d'admettre, compte tenu de la nature et de l'intensité des liaisons, que la disposition des paquets de cristallites d'argile les uns par rapport aux autres soit modifiée par l'introduction du squelette.

La standardisation des conditions de préparation du matériau argileux (extraction, floculation, centrifugation), de réalisation et de séchage des échantillons, rendent tout à fait plausible ce postulat.

Seule l'utilisation de cations différents lors de la floculation, ou l'application à l'échantillon au cours du séchage de fortes contraintes externes seraient susceptibles de modifier la densité apparente de la phase argileuse.

L'homogénéité des résultats obtenus quant à la mesure des densités apparentes du matériau HB provenant d'extractions échelonnées dans le temps, va également dans ce sens.

— Au-delà des limites précédemment indiquées de 70 p. 100 et de 50 p. 100 d'argile, la bonne concordance entre les porosités calculées et observées, tant à l'état

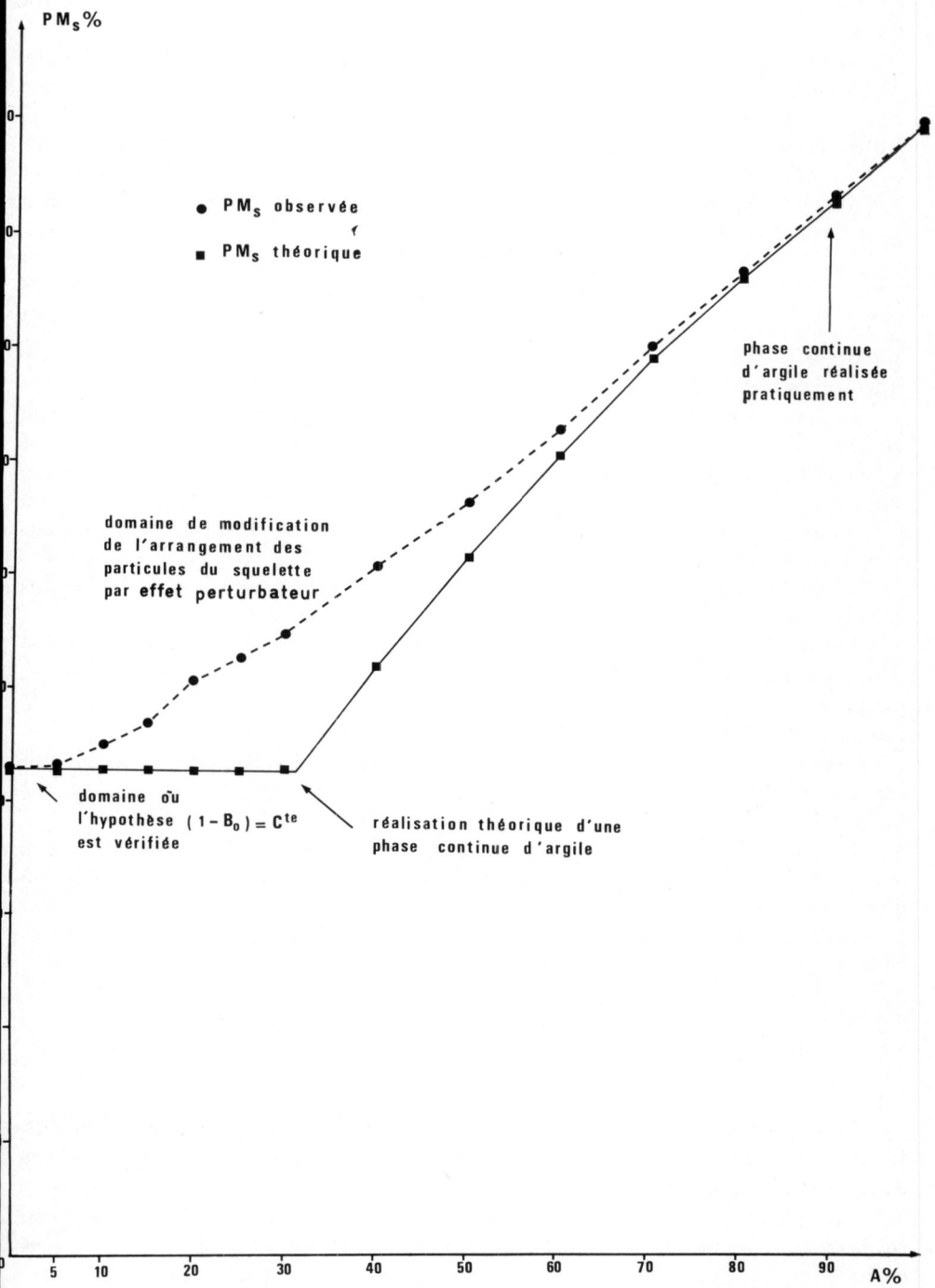



FIG. 3. — *Évolution comparée des porosités matricielles observées et théoriques, à l'état sec, dans la série HB 2-50 μ.*

sec qu'à l'état humide, permet d'affirmer alors qu'une phase continue d'argile est réalisée.

Les figures 4 et 5 où l'on a porté le taux d'occupation volumique, T, par l'argile, du volume laissé vide entre les grains du squelette en fonction de la teneur pondérale en argile dans les mélanges illustrent la réalisation de phases continues dans les différentes séries.

$V_a$ et $V_s$ représentant respectivement le volume apparent de l'échantillon et le volume du squelette et $v'_a$ étant le volume apparent de la phase argileuse, on a pour l'échantillon considéré :

$$T = \frac{V_a - V_s}{v'_a}$$

Si les volumes de vides intergranulaires sont donc directement mesurés, les volumes apparents d'argile sont calculés à partir de la mesure de densité apparente effectuée sur un échantillon d'argile pure.

On peut constater sur la figure 5 qui concerne les échantillons saturés en eau, un taux d'occupation légèrement supérieur à 100 p. 100 pour les séries HB et M à partir de 70 p. 100 d'argile. Ceci est certainement lié à une erreur systématique sur l'appréciation des volumes apparents humides des matériaux argileux purs où se développe au cours de l'humectation un réseau inévitable de microfissures entraînant une surévaluation du volume occupé par l'argile.

L'erreur relative résultante reste de l'ordre de 3 p. 100 pour le matériau le plus gonflant (M) et ne modifie en rien les conclusions tirées des résultats.

En définitive, il ressort de cette analyse globale que l'effet perturbateur se manifeste dans toutes les séries et qu'il a pour conséquence la modification de l'arrangement du squelette, ce qui se traduit par des valeurs de porosité matricielle toujours supérieures à celles prévues par le modèle théorique.

Ceci admet pour corollaire que la phase continue d'argile dans les différentes séries se réalise pour des teneurs en argile beaucoup plus élevées que ne le laisse prévoir le modèle théorique.

La porosité matricielle du squelette apparaît donc comme le paramètre le plus adapté à l'étude détaillée de la perturbation des particules liées à l'introduction d'une phase argileuse.

Nous allons maintenant proposer et discuter une interprétation physique susceptible de rendre compte de cet effet de perturbation mise en évidence.

## III. — DISCUSSION ET ESSAI D'INTERPRÉTATION

Le problème posé consiste donc à rechercher un type de disposition des constituants qui permette de rendre compte de l'écartement des particules du squelette et de la réalisation d'une phase continue à partir d'une certaine teneur en argile.

Un premier schéma d'interprétation est suggéré par l'étude de Monnier (1966) sur la couleur des terres en relation avec leur texture, et notre travail sur les relations entre la stabilité structurale et la surface spécifique des particules du squelette (1970), où un ensemble de résultats convergents conduit à considérer la fraction argileuse comme répartie à la surface des particules associées.

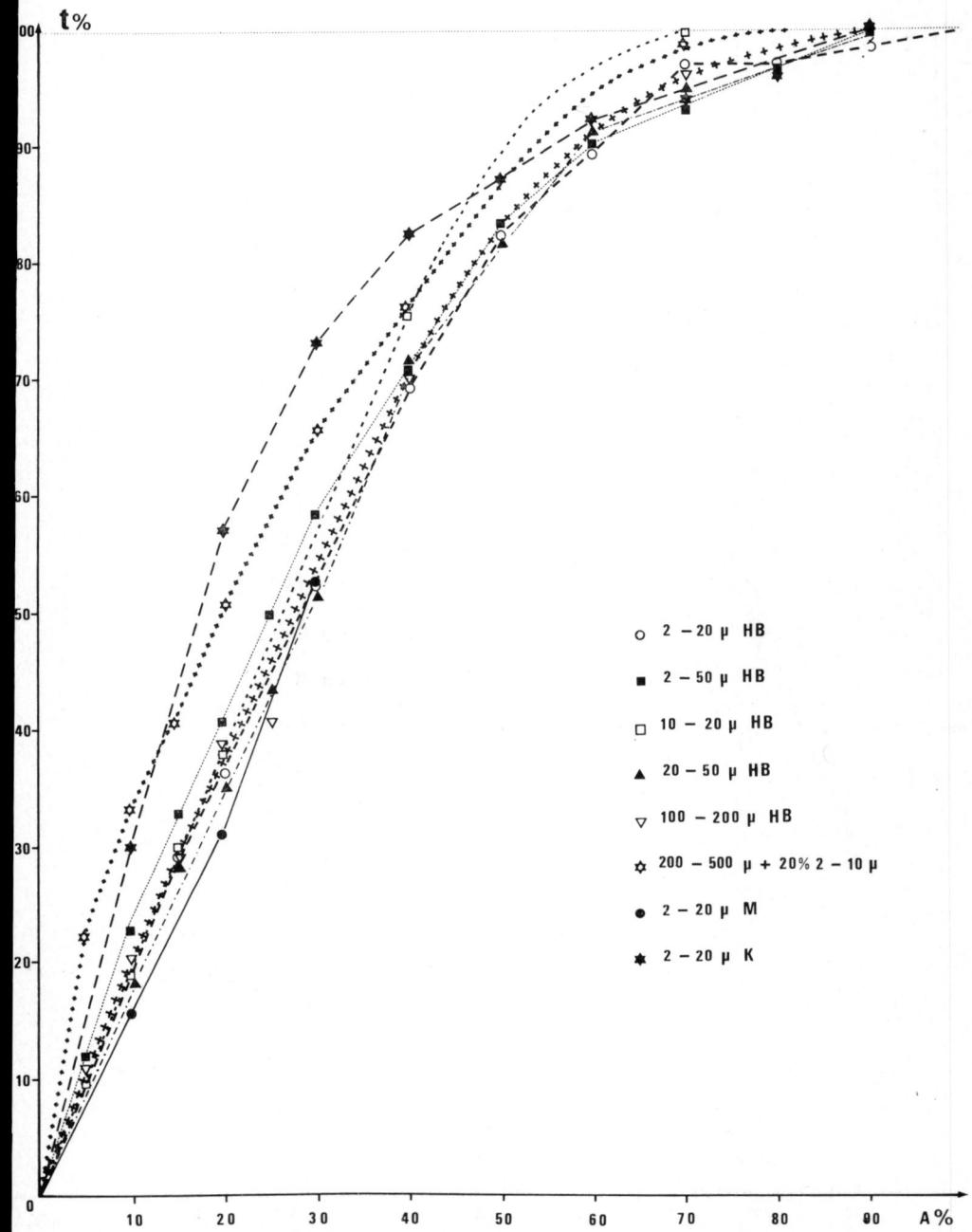



FIG. 4. — *Taux d'occupation par l'argile du volume laissé vide entre les grains du squelette, à l'état sec*

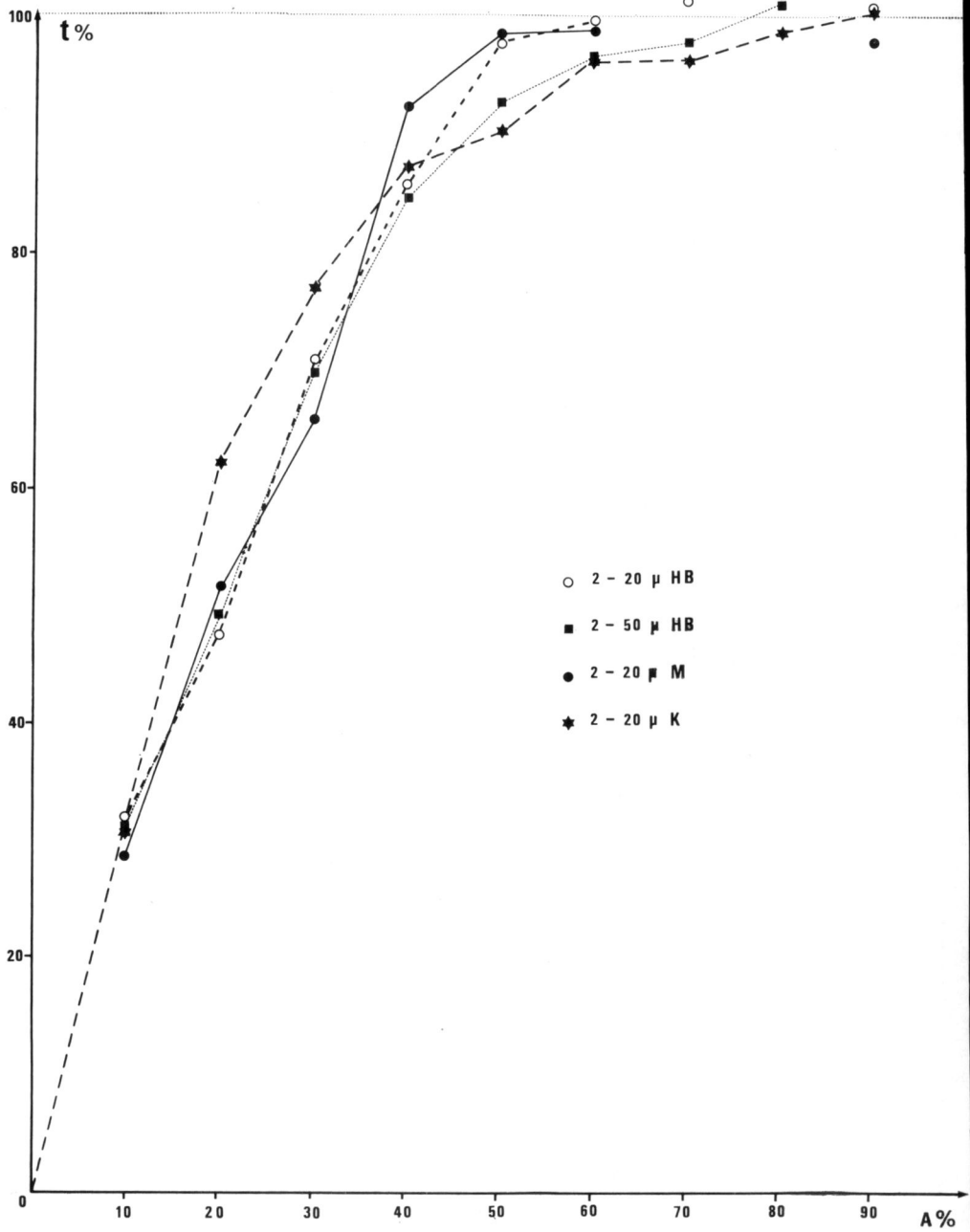



FIG. 5. — *Taux d'occupation par l'argile du volume laissé vide entre les grains du squelette, à l'état saturé*

C'est en tenant compte d'une telle tendance quant à la répartition de l'argile que nous allons tenter d'interpréter l'effet de perturbation.

### A. — *Méthode de calcul*

A partir d'une hypothèse d'enrobement de l'argile, nous allons introduire les données expérimentales obtenues sur la porosité matricielle afin d'en tirer les conséquences quant à la répartition de la fraction argileuse.

Les simplifications nécessairement introduites portent sur la forme des particules du squelette, qui sont supposées être sphériques, et sur la taille, les particules étant supposées isodiamétriques dans une fraction granulométrique donnée.

Considérons, figure 6, une sphère de diamètre $d$ et de volume $V_s$ idéalement enrobée par une couche homogène d'argile. L'ensemble enrobé constitue une nouvelle sphère de diamètre $d'$ et de volume $V_s'$. Un massif de ces sphères enrobées présente une certaine porosité d'arrangement et occupe un certain volume apparent. On peut donc dire qu'une sphère enrobée occupe un certain volume apparent $V_a$, la porosité d'arrangement $P_0'$ étant définie par l'équation

$$P_0' = \frac{V_a - V_s'}{V_a}$$

De même, la porosité matricielle $P_M$ est définie par l'équation

$$P_M = \frac{V_a - V_s}{V_a}$$

De ces deux équations, on déduit une relation permettant d'exprimer le volume $V_s'$ de la sphère enrobée en fonction des valeurs de $P_M$ et $V_s$ :

$$V_s' = \frac{1 - P_0'}{1 - P_M} \cdot V_s \qquad (4)$$

On constate que pour déterminer $V_s'$, il est nécessaire de formuler une hypothèse quant à l'arrangement des particules enrobées elles-mêmes, défini par $P_0'$.

Nous avons admis ici que la disposition des sphères enrobées est semblable à celle présentée initialement par des sphères nues, la valeur de $P_0'$ étant alors définie par la porosité initiale d'un massif de ces sphères.

### B. — *Résultats obtenus sur les mélanges argile-squelette*

Nous avons appliqué ce mode de calcul au cas concret de nos mélanges, en prenant comme valeur de $d$ celle du diamètre équivalent déterminé sur chacun des squelettes utilisés.

1. *Taux de participation de l'argile à l'enrobage des particules.*

A partir des valeurs expérimentales des porosités matricielles, nous avons calculé alors le volume $V_s'$, puis le volume apparent d'argile participant à l'enrobement, $V_0$, ce dernier étant défini par la différence $V_s' - V_s$, pour l'ensemble des séries réalisées.

Il est possible alors de comparer ce volume ainsi calculé au volume apparent $V_a'$ d'argile effectivement introduit dans le mélange. Cette dernière donnée est cal-

culée à partir de la teneur pondérale en argile du mélange, sur la base de la mesure de densité apparente effectuée sur de l'argile pure.

On a porté sur la figure 7 le taux de participation de l'argile à l'enrobage des particules de squelette en fonction de la teneur pondérale en argile. Ce taux est défini par le rapport du volume d'argile d'enrobement au volume total d'argile introduite : $\frac{V_e}{V_a'}$.

Ces résultats concernent les séries HB, 100-200 μ et HB, 10-20 μ, considérées à l'état sec, pour lesquelles la notion de diamètre équivalent s'approche de la réalité, ces fractions étant caractérisées par des limites de taille étroites.

Il apparaît ainsi que seule une fraction de l'argile introduite participe à l'enrobement.

Si ce taux de participation est irrégulier et, pour une même teneur en argile, varie selon le squelette considéré, il reste en général inférieur à 50 p. 100.

Des résultats tout à fait semblables sont obtenus avec les échantillons des autres séries.

Nous avons présenté sur la figure 6, une illustration des conséquences que l'on peut tirer de ces résultats. La figure 6 *a* correspond au premier schéma d'interprétation où l'on suppose que l'argile participe uniquement au revêtement superficiel des squelettes.

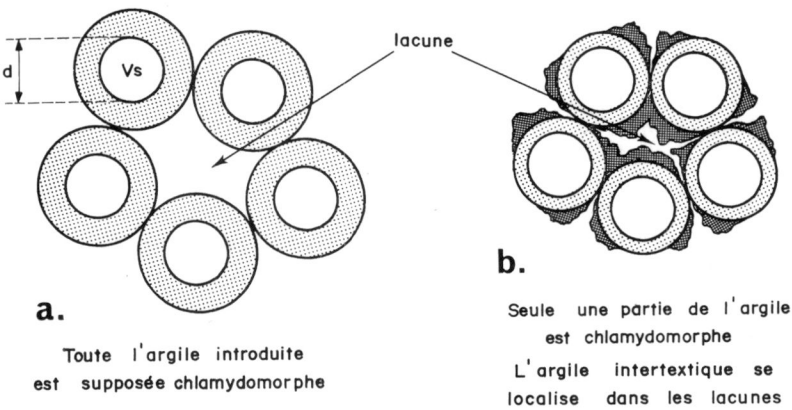



FIG. 6. — *Illustration de l'hypothèse de l'enrobement des particules par l'argile*

Le calcul montre ici, à partir de la même hypothèse que celle faite précédemment sur la porosité $P_0'$ des particules enrobées, que les valeurs de $P_M$ que l'on peut ainsi obtenir sont très supérieures aux valeurs observées, toutes choses égales par ailleurs. L'écartement des particules de squelette est trop important : on a en quelque sorte un effet perturbateur maximum.

La figure 6 *b*, tient compte de la répartition de l'argile calculée à partir des valeurs observées de porosité matricielle. L'argile « excédentaire » ne participant pas à l'enrobement se situe dans les lacunes ménagées entre les particules enrobées.

On est conduit à distinguer entre une argile chlamydomorphe (KUBIENA 1938) qui est responsable de l'écartement des particules du squelette et une argile intertextique qui comble plus ou moins les lacunes restantes.

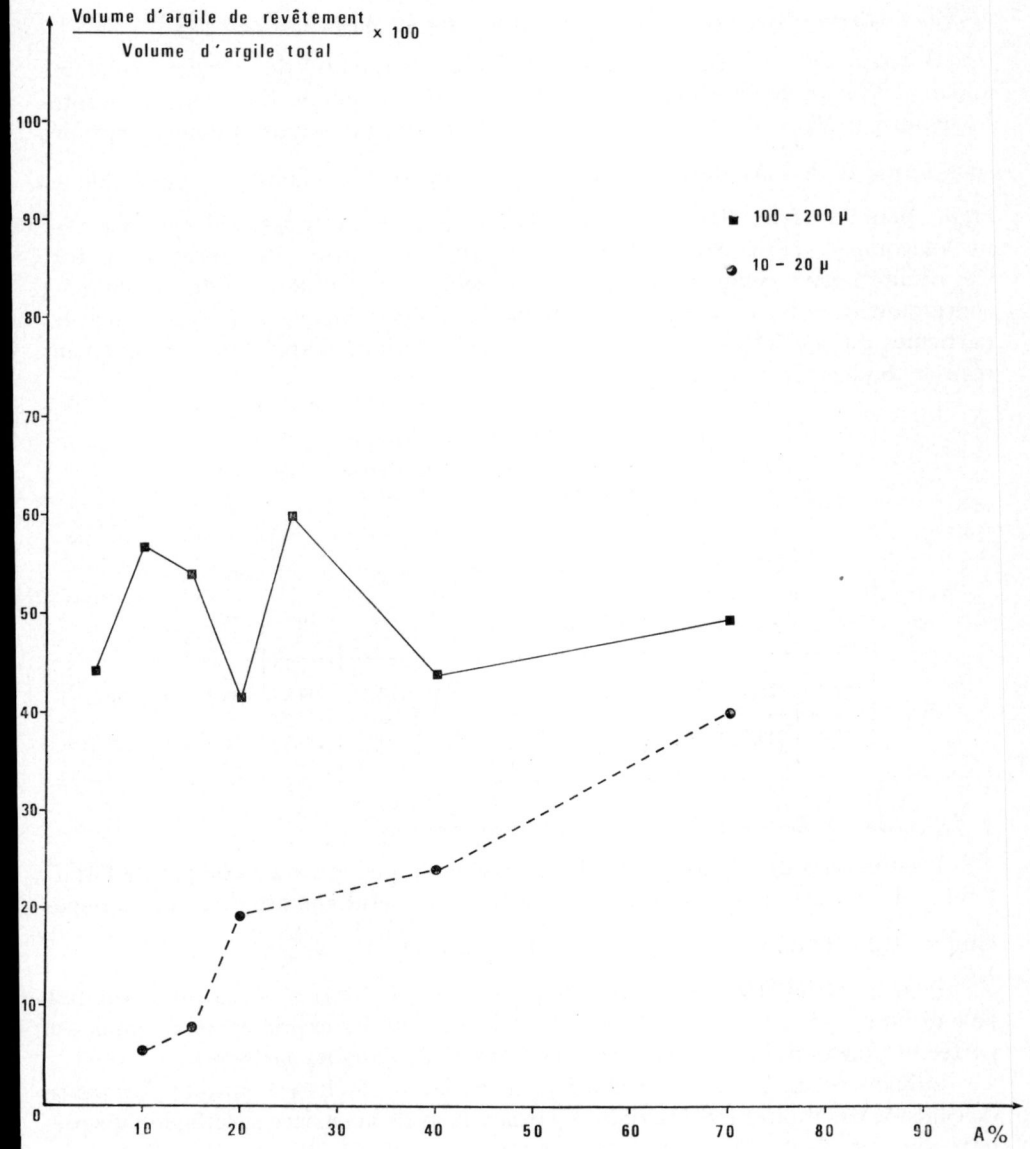



FIG. 7. — *Participation de l'argile à l'enrobage des particules*
(Échantillons séchés 105°)

Ce second schéma a l'avantage de suggérer une explication quant à la possibilité de réalisation d'une phase continue d'argile par occupation totale des lacunes, ce que le premier schéma ne pouvait faire apparaître.

2. *Taux de remplissage des lacunes ménagées entre les particules enrobées.*

A partir des données calculées précédentes, il est aisé de calculer le volume apparent $V_i$ d'argile intertextique et de le comparer au volume des lacunes restantes $V_l$ défini par $V_a - V_s$. Le tableau 9 présente les résultats ainsi obtenus, exprimés sous forme d'un taux de remplissage $\frac{V_i}{V_l}$, en fonction de la teneur pondérale en argile, pour les séries HB, 2-20 μ et HB, 2-50 μ à sec, avec lesquelles on a réalisé un lot complet d'échantillons de teneur en argile comprise entre 10 et 90 p. 100. Ces résultats nous conduisent à la même conclusion que celle tirée du graphique 3 concernant le taux d'occupation par toute l'argile des lacunes ménagées entre les particules du squelette, à savoir, que la phase continue d'argile est pratiquement réalisée au-delà de 70 p. 100 d'argile.

TABLEAU 9

*Taux calculés de remplissage des vides intergranulaires par l'argile intertextique à l'état sec*

| Nature | Argile p. 100 | | | | | | | | | Squelettes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | |
| HB | 18,2 | 28,9 | 45,5 | 56,3 | 71,6 | 80,2 | 85,4 | 90,3 | 96,2 | 2-50 μ |
| | 15 | 25,4 | 39,8 | 57,4 | 72,8 | 81,6 | 91,8 | 98,7 | 10,3 | 2-20 μ |

3. *Épaisseur de la couche d'argile chlamydomorphe.*

L'estimation de l'épaisseur $E_c$ de la couche d'argile qui rend compte de l'écartement des grains du squelette peut s'effectuer en tenant compte de la surface spécifique S des particules du squelette. On a en effet : $E_c = \frac{V_c}{S}$.

Pour les séries HB 100-200 μ ; 2-50 μ ; 2-20 μ, à l'état sec, ce calcul a conduit aux résultats présentés sur la figure 8 où l'épaisseur $E_c$ exprimée en microns est portée en fonction du volume apparent d'argile $V_{\acute{a}}$ dans les mélanges.

Suivant ce mode de représentation, la variation de $E_c$ est linéaire. La pente de chacune des droites est déterminée par la valeur de la surface spécifique du squelette correspondant : plus celle-ci est élevée, plus l'épaisseur d'argile chlamydomorphe est faible à teneur en argile égale.

4. *Essai de vérification.*

a) *Prévision des porosités matricielles humides.*

Afin de tester la validité des hypothèses qui ont conduit au modèle de distribution de l'argile que l'on a proposé, nous avons essayé de prévoir les valeurs de la

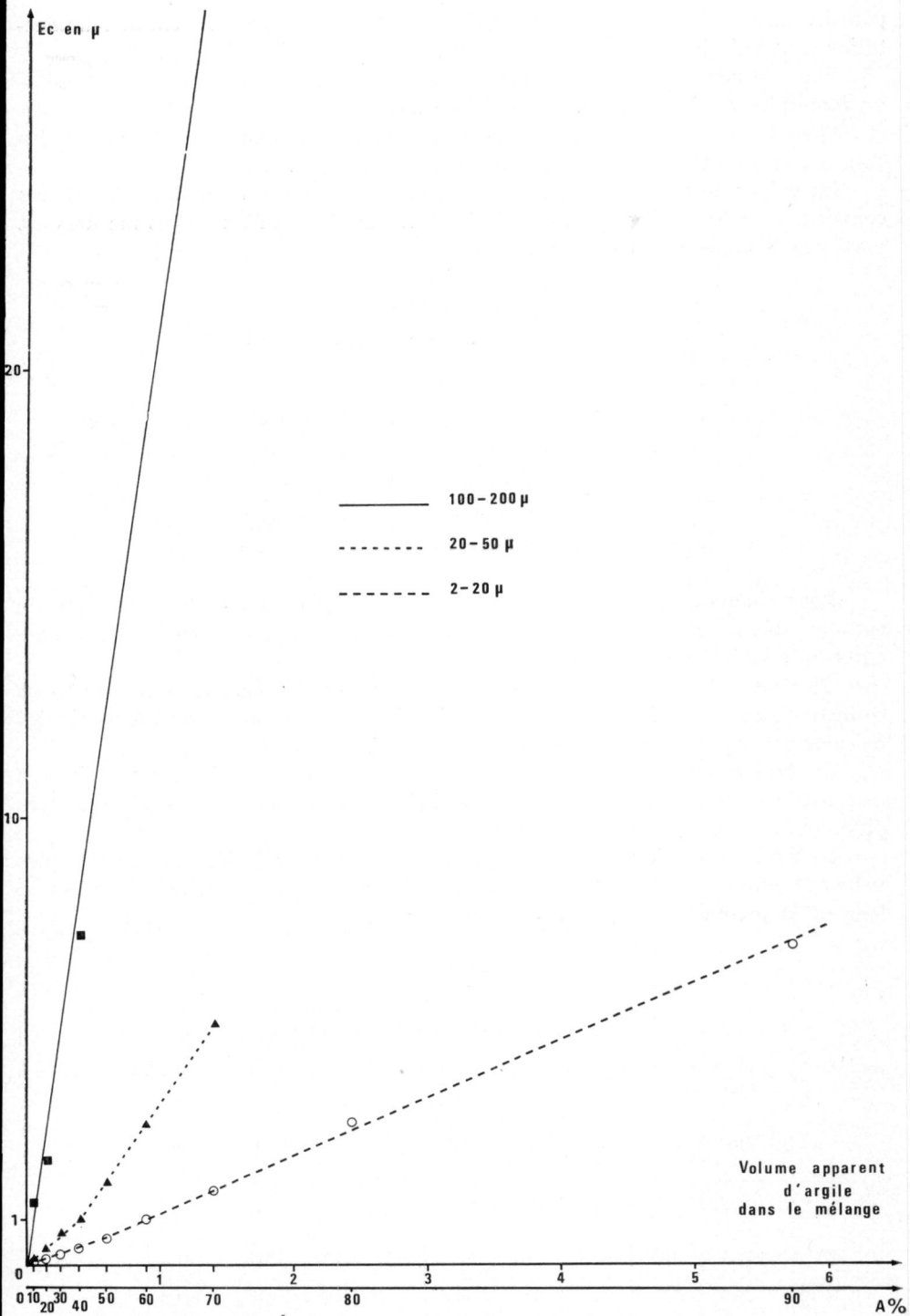



FIG. 8. — *Épaisseur calculée de la couche d'argile chlamydomorphe en fonction du volume d'argile introduit*

(Échantillons secs, série HB)

porosité matricielle humide de séries d'échantillons soumis au traitement de réhumectation sous vide jusqu'à saturation en eau, à partir de l'équation (4).

Pour ces mêmes échantillons, nous disposions des volumes calculés d'argile chlamydomorphe $V_c$, à l'état sec. Le terme de passage entre ces volumes à l'état sec et à l'état humide représente un indice de gonflement $I_g$ défini par les rapports des volumes apparents humides aux volumes apparents secs.

La valeur de cet indice $I_g$ a été successivement mesurée sur des échantillons constitués par les argiles M, HB et K à l'état pur. Le résultat de ces mesures est porté sur le tableau 10 ci-dessous.

TABLEAU 10

*Estimation du gonflement des argiles utilisées*

| Argile | M | HB | K |
|---|---|---|---|
| $Ig = \frac{\text{Volume apparent humide}}{\text{Volume apparent sec}}$ | 2,53 | 1,63 | 1,17 |

Pour chaque mélange, le volume apparent d'argile chlamydomorphe humide est alors défini par le produit $V_c \cdot I_g$. Dans l'équation (4), le volume de la sphère enrobée humide est alors $V\acute{s} = V_c \cdot I_g + V_s$.

On peut définir alors une porosité matricielle humide calculée qur l'on peut comparer aux porosités matricielles humides déterminées directement à partir des mesures des volumes apparents humides des échantillons.

Ces calculs ont été effectués sur les séries où, au même squelette 2-20 $\mu$ étaient associées les argiles M, HB et K dont les indices de gonflement mesurés sont très différents ainsi que le montre le tableau 10.

La figure 9, où l'on a porté les valeurs de $P_M$ ainsi calculées en fonction des valeurs mesurées, montre que pour l'ensemble des séries, les points s'alignent le long de la première bissectrice.

TABLEAU 11

*Taux calculés de remplissage des vides intergranulaires par l'argile intertextique à l'état humide*

| Nature | Argile p. 100 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | Squelettes |
| M | 7,2 | 32,2 | 48 | 97,3 | 98,2 | 99,5 | 106 | 107 | 107 | |
| HB | 30,4 | 37,4 | 62,8 | 81,2 | 99,2 | 103 | 105 | 103 | 104 | 2-20 $\mu$ |
| K | 22,9 | 62 | 75,6 | 82,1 | 86,1 | 95,4 | 93,6 | 100,5 | 99,7 | |

b) *Prévision de l'apparition d'une phase continue d'argile à l'état humide.*

En utilisant l'indice de gonflement mesuré, on peut également calculer le volume apparent humide d'argile intertextique, qui est défini par le produit $V_i \cdot I_g$, et calculer pour les séries précédentes le taux de remplissage $\frac{V_i \cdot I_g}{V_l}$ dans les différents mélanges.

Les résultats portés au tableau II sont en accord avec les conclusions tirées de la figure 5 où sont portés les taux d'occupations par l'ensemble de l'argile des vides interparticulaires, à l'état humide : la phase continue se réalise plus tôt qu'à l'état sec et pour des teneurs pondérales en argile comprises entre 50 et 60 p. 100.

## IV. — CONCLUSION

Nous proposions, au début de cette étude, de rechercher la signification physique d'un effet de perturbation responsable de l'inadéquation du modèle théorique proposé à la prévision de la porosité totale d'un mélange binaire de particules. Nous avons montré, par l'étude d'échantillons artificiellement constitués à partir d'argiles et de particules associées et présentant une structure continue, que cet effet perturbateur était général. Cette perturbation se traduit au niveau de la porosité matricielle propre au squelette par un accroissement de cette porosité dès l'introduction d'une phase argileuse dans le massif de particules complémentaires.

La recherche d'une signification physique du phénomène nous a conduit à présenter une hypothèse texturale autre que celle proposée dans le modèle théorique, à savoir la disposition d'une fraction de l'argile à la surface des particules du squelette, la fraction restante se disposant dans les lacunes ménagées entre les particules de squelette enrobées.

Ce schéma textural rend bien compte, au niveau global où se situe notre étude, de l'accroissement de la porosité matricielle consécutif à l'introduction d'argile dans le mélange ainsi que de la réalisation d'une phase continue argileuse, cette dernière se produisant à des teneurs en argile bien plus élevées que celles prévues par le modèle théorique.

Appliqué à des échantillons saturés en eau, ce schéma reste satisfaisant, car il permet la prévision des deux paramètres précédents à partir de la seule estimation du gonflement du matériau argileux pur utilisé.

Confronté à la disposition de la phase argileuse suggérée par MONNIER (1967) dans son étude sur la couleur des terres, la disposition proposée ici ne fait que nuancer les conclusions de l'auteur, l'épaisseur du film argileux revêtant le squelette restant inversement proportionnelle à la valeur de la surface à revêtir.

Par contre, la réalisation d'une phase argileuse continue aux teneurs en argile supérieures à 70 % infirme l'idée, plus ou moins implicite, que la notion texturale de terre argileuse, définie sur le triangle de texture par une limite à 40-45 p. 100 d'argile, correspond à l'existence d'une phase continue argileuse dans le matériau.

En fait, on a vu, quelles que soient la nature de l'argile et sa potentialité de gonflement, que la phase continue ne se réalise que pour des teneurs en argile élevées. De ce point de vue et pour des terres saturées en eau, cette phase continue peut

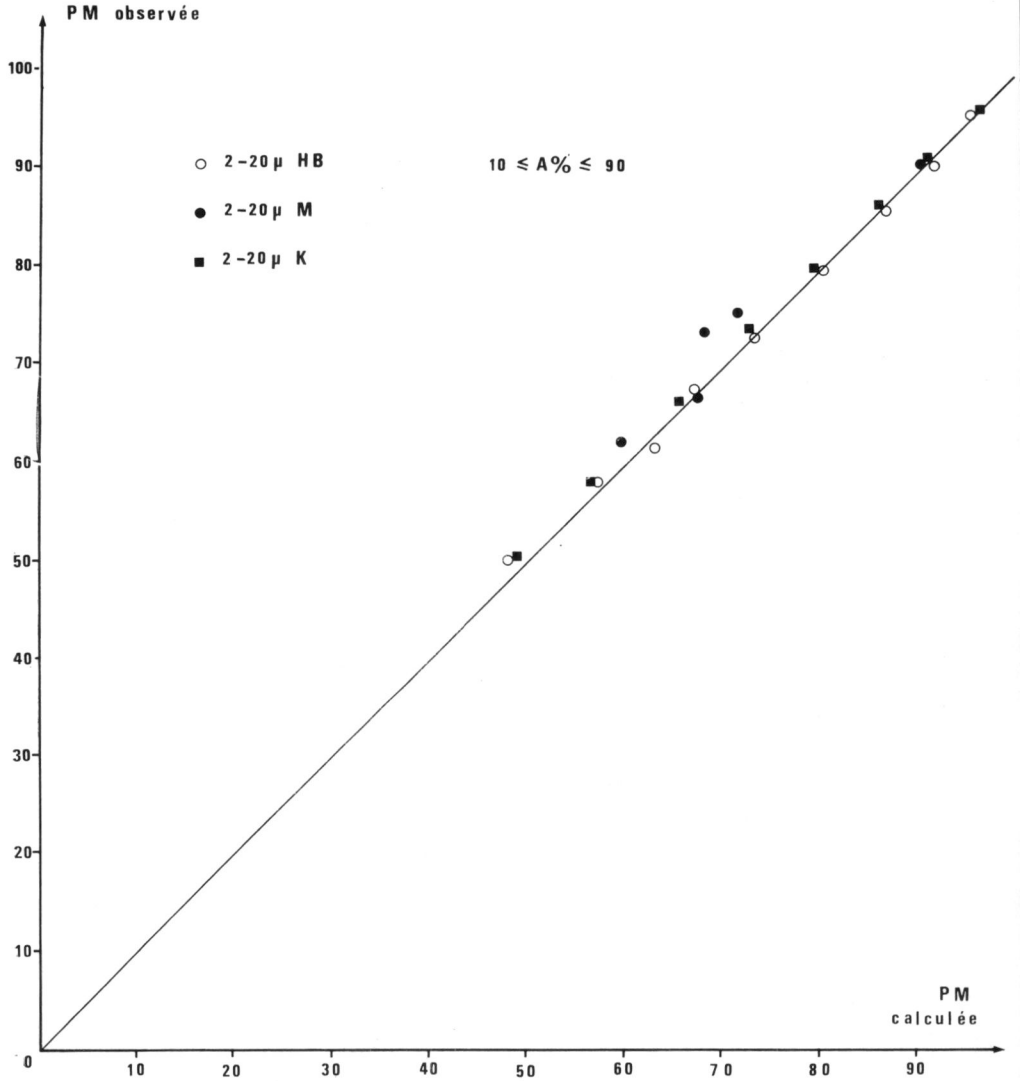



FIG. 9. — *Comparaison entre les valeurs calculées et observées des porosités matricielles à l'état humide*

exister dans les terres argileuses lourdes, définies sur le triangle de texture par des teneurs en argile supérieures à 60 p. 100.

Tout au cours de cette étude, il est apparu nettement que les caractéristiques propres aux squelettes utilisés, ainsi que la nature minéralogique des argiles associées étaient susceptibles d'influer sur les variations des paramètres considérés. Le schéma de la disposition relative des constituants ayant été dégagé, nous allons entreprendre dans une étude ultérieure de définir le rôle de ces différents facteurs.

*Reçu pour publication en juillet 1971.*

## SUMMARY

### TEXTURAL ASPECT OF SOIL POROSITY

The relationship between the overall porosity of soils and their texture is undertaken on the soil fabric level from models consisting of clay and soil skeleton mixture.

The latter are selected from loams, silts and sands in combination of different proportions of clay, *i. e.*, a kaolinite, a montmorillonite and a mixture (extracted from soil) of those two, with illite.

These mixtures are made according to a record whereby the samples so obtained where massives and structureless.

Next, after measuring the overall porosities of the various samples, the data are compared with those computed by means of a theoretical structural model.

This comparison highlights the disturbance brought about in the arrangement of the skeletal particles on initiation of the clay phase.

This physical effect conduced us to propound, taking as basis the apparent density of the argillaceous phase and the specific surface of the grain skeleton, an equivalent soil fabric model.

In the latter, the available clay contributes both to coating the skeletal particles (chlamydate clay) and filling-in of the intergranular voids (intertextic clay).

This arrangement was defined with dry samples but is applicable to water-saturated samples. The parametric values, defining the skeletal arrangement (matrix porosity) and the percentage of clay in the intergranular voids was then derived from determination of the swelling of pure clay.

## ZUSAMMENFASSUNG

### ERFORSCHUNG EINER TEXTURALEN INTERPRETATION DER BODENPOROSITÄT

Die Untersuchung der Beziehungen zwischen der Gesamtporosität der Böden und ihrer Textur wird an Hand von Mustern, die aus binären Mischungen von Ton und Skelett bestehen, auf der Ebene der elementaren Zusammensetzung zwischen den Bestandteilen erörtert.

Die verwendeten Skelette werden unter den Lehmen und den Tonen ausgewählt. Sie sind in verschiedenen Proportionen zu drei verschiedenen mineralogischen Tontypen zugegeben : ein Kaolinit, ein Montmorillonit und eine Mischung aus Illit, Kaolinit, Montmorillonit. Zur Erziehung eines kontinuierlichen Gefüges für die Muster werden die Mischungen nach einem entsprechenden Protokoll hergestellt.

Die auf den verschiedenen Mustern gemessenen Gesamtporositäten werden mit denen an Hand eines theoretischen Anordungsmodelles berechneten verglichen. Dieser Vergleich erlaubt aufzuzeigen, dass die Störung der Anordnung der Skelettteilchen gleich nach der Einführung der Tonphase stattfindet. Die physikalische Ausdeutung dieser Störungswirkung lässt uns den Vorschlag machen, unter Zugrundelegung auf Bestimmungen der scheinbaren Dichte der

Tonphase und der spezifischen Fläche des Skeletts, eine elementare äquivalente Anordnung anzunehmen.

In dieser Anordnung beteiligt sich der anwesende Ton an der Umhüllung der Skelettteilchen (chlamydomorpher Ton) und am Ausfüllen der Lücken zwischen den Teilchen (Intertextur-Ton). Festgestellt für trockene Stichproben kann diese Anordung für wassergesätigte Stichproben angewandt werden. Die Bestimmung der Quellung des reinen Tons ermöglicht dann die Parameterwerte vorauszusehen, die die Anordunung des Skeletts (Matrizenporosität) sowie des Tonbesetzungsrate zwischen den Teilchen des Skeletts zu bestimmen.

## РЕЗЮМЕ

Поиски интерпретации порозности почв, основанной на их механическом составе.

Ж. К. ФИЕС.

Изучение соотношений между общей порозностью почв и их механическим составом была предпринята на уровне элементарного набора составных частей, при помощи моделей состоявших из бинарных смесей глины и почвенного скелета.

Применявшиеся скелеты выбирались из суглинков и песков. Они смешивались в различных пропорциях с тремя сортами минеральных глин : монтмориллонитом, каолинитом и смесью иллита, каолинита и монтмориллонита. Смеси эти реализовались способом позволяющим получать пробы со сплошной структурой.

Величины общей порозности измерявшиеся на различных пробах сравнивались с величинами вычисленными с помощью теоритической модели устройства.

Сравнение это позволило выявить пертурбацию устройства частичек почвенного скелета, сразу после введения глинистой фазы. Физическая интерпретация данного эффекта пертурбации заставляет автора предложить эквивалентное элементарное устройство, на базе определения видимой плотности глинистой фазы, и специфической поверхности почвенного скелета.

Присутствующая глина принимает участие в покрытии частичек скелета оболочкой (хламидоморфная глина), и в заполнении между-частичных промежутков (интертекстичная глина). Это устройство, определявшееся на сухих пробах, можно применить и к пробам насыщенным водой. Определение набухания чистой глины даст возможность, в этом случае, предвидеть величины параметров определяющих устройство почвенного скелета (матрициальная порозность), и долю пространсте существующих между частицами скелета и заполненных глиной.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FIÈS J.-C., 1970. Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale. *Sci. Sol*, **2**, 27-37.

HÉNIN S., FIÈS J.-C., MONNIER G., 1970. Étude théorique de la porosité des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *C. R. Acad. Sci.*, **271**, 1960-1963.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

KUBIENA W. L., 1938. *Micropedology*. Collegita press Amer, 1 vol.

MAERTENS C., 1965. Deux méthodes de détermination de la densité du sol en place. Leur possibilité d'utilisation. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **8**, 283-293.

MONNIER G., 1966. Sur la couleur des terres considérée comme une caractéristique texturale. *C. R. Acad. Sci.*, **264**, 2188-2191.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (6), 687-703.

# VIEILLISSEMENT D'ENGRAIS PHOSPHATÉS DANS LE SOL ET CONDUITE DE LA FERTILISATION

R. BLANCHET, M. BOSC, N. GELFI et A. HILAIRE

*Station d'Agronomie,*
*Centre de Recherches de Toulouse, I. N. R. A.,*
*B.P. 12, 31 - Castanet*

## RÉSUMÉ

Le terme de « vieillissement » est employé ici pour désigner l'ensemble de l'évolution d'un engrais phosphaté dans le sol, au cours du temps ; nous n'avons pas procédé à l'étude des réactions physico-chimiques intervenues, mais seulement tenté d'apprécier globalement les conséquences de ces processus à l'égard de la fertilisation.

Trois approches ont été utilisées :

1) Des tests de laboratoire (dilutions isotopiques, extractions par une résine, concentration en P de la phase liquide) montrent une diminution marquée de l'activité du phosphore apporté par l'engrais, au cours des tout premiers mois suivant l'apport. Il se produit ensuite une stabilisation approximative, sauf dans le sol acide examiné.

2) Des cultures de ray-grass en petits vases de végétation, conduites après trois et quinze mois de vieillissement, ne décèlent pas d'évolution marquée entre ces deux durées. La dose d'engrais apportée influence peu ce vieillissement.

3) Des expérimentations au champ indiquent que, dans un sol brun légèrement calcaire régulièrement entretenu, l'alimentation des cultures peut s'effectuer normalement à partir de fumures relativement anciennes. Le vieillissement de l'engrais a des répercussions beaucoup plus marquées en terre très pauvre et acide.

La méthodologie de ces études est discutée sous l'angle agronomique : on se demande si la plante n'est pas meilleur juge de ces processus que les diverses études de laboratoire, qui ne fournissent qu'un aspect partiel des facteurs de l'alimentation.

Les conséquences relatives à de nouvelles techniques culturales sont enfin examinées : fumures pluriannuelles, localisation, non-labour, irrigation.

## INTRODUCTION

Tant en France qu'à l'étranger, l'évolution des engrais phosphatés dans le sol a fait l'objet d'un nombre considérable de recherches de laboratoire (DEMOLON et BARBIER, 1930 ; DEMOLON, 1952 ; LARSEN *et al.*, 1965 ; DUTIL et DUMON, 1967), ainsi que d'expérimentations culturales (GERVY, 1970). On pourrait en déduire

que ce sujet, quoique fort complexe, est relativement bien connu, et ne pose plus guère de problèmes quant à la conduite de la fertilisation.

Cependant, les agronomes restent souvent embarrassés pour répondre à certaines questions pratiques, car les techniques culturales évoluent sans cesse. En effet, si la fumure phosphatée se pose de plus en plus en termes d'entretien plutôt que de redressement, du moins en zone d'agriculture évoluée, les modalités de cet entretien prennent de nouveaux aspects : blocage des apports sur plusieurs années pour limiter le travail et les frais d'épandage ; fumure des cultures pérennes (arbres fruitiers, prairies...) de telle sorte que les ions $PO_4$, qui migrent peu, se trouvent à la disposition des racines ; techniques de non-labour, de localisation, d'irrigation, d'extensification, etc.

De diverses manières, ces nouvelles techniques posent le problème du maintien des engrais phosphatés sous forme utilisable par la plante, au cours de leur « vieillissement » dans le sol, à diverses doses d'apport (fumure annuelle ou bloquée, localisée ou non...).

Notre but n'est pas ici d'étudier les réactions physico-chimiques qui interviennent au cours du vieillissement, et dont divers processus sont relativement connus (LINDSAY et MORENO, 1960 ; ARVIEU, 1969) ; il est seulement de tâcher d'apprécier de manière globale les répercussions de ce vieillissement sur l'évolution de la disponibilité des ions $PO_4$ à l'égard des plantes, dans quelques terres de constitutions différentes, et dans un éventail de fumures réellement pratiquées, de façon à mieux éclairer divers problèmes de fertilisation.

Nous nous situons donc dans une approche globale de cette question. En effet, ainsi que nous le discuterons ci-dessous, les facteurs de l'alimentation phosphatée de la plante dans le sol sont complexes, nombreux et soumis à diverses interactions. Aussi, l'intervention présumée de certaines réactions chimiques ou la considération de certaines critères d'évolution des phosphates, ne permettent souvent pas de préjuger automatiquement de ce que sera la réaction de la plante. C'est donc une vue certes empirique, mais globale, que nous tenterons d'apporter en attendant que nos connaissances des mécanismes et de leurs répercussions exactes, se précisent mieux.

Nous nous sommes adressés pour cela à quelques tests de laboratoire reflétant le moins mal possible les conditions d'alimentation de la plante, à des cultures en vases de végétation, et à des expérimentations au champ.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. — *Sols étudiés*

Ces sols appartiennent aux grands types rencontrés dans la région toulousaine ; ils ont été décrits en détail par ailleurs (BLANCHET *et al.*, 1966) :

1) sol limono-sableux lessivé, assez nettement acide, sur alluvions anciennes de la Garonne (MARTY et FIORAMONTI, 1970).

2) sol brun, argileux, très légèrement acide, formé sur molasse tertiaire ;

3) sol brun légèrement calcaire, dérivé également de molasse ;

4) sol brun calcaire (40 p. 100 $CaCO_3$), renfermant une proportion appréciable de calcaire actif (12,5 p. 100), formé sur molasse calcaire.

Le tableau 1 résume les principaux caractères de ces sols ; à l'exception du second, ils sont pauvres en phosphore.

TABLEAU I

*Principaux caractères des sols étudiés*

| Composition | N° 1 | N° 2 | N° 3 | N° 4 |
|---|---|---|---|---|
| Argile (%) | 11,2 | 25,4 | 24,5 | 18,5 |
| Limons fins (%) | 25,3 | 22,2 | 19,7 | 13,3 |
| Limons grossiers(%) | 37,5 | 15 | 12 | 7,5 |
| Sables fins (%) | 13,5 | 16,5 | 14 | 8 |
| Sables grossiers (%) | 11,5 | 16 | 13 | 8 |
| Matières organiques (%) | 1,0 | 1,8 | 1,7 | 2 |
| Calcaire (%) | 0 | 0 | 5,8 | 40,4 |
| Calcaire actif (%) | — | — | 3 | 12,5 |
| pH | 5,6 | 6,0 | 8,2 | 8,5 |
| CEC (méq/kg) | 69 | 202 | 188 | 165 |
| Fer libre (Deb) (%) | 1,73 | 0,83 | 0,94 | 0,55 |
| $P_2O_5$ assimilable (‰) : | | | | |
| Joret-Hébert | 0,052 | 0,165 | 0,10 | 0,033 |
| Dyer | 0,12 | 0,32 | — | — |

B. — *Études de laboratoire*

La terre fine de ces sols, soigneusement homogénéisée, a été répartie en échantillons de 25 g placés dans des petits récipients de matière plastique,et enrichis de quantités croissantes et exactement connues de phosphate monocalcique ($PO_4H_2$) 2 Ca, $H_2O$ correspondant sensiblement aux fumures suivantes (pour 4 000 tonnes/ha de terre) :

— Témoin sans P (T)
— 5,45 p.p.m. P, soit environ 50 kg/ha $P_2O_5$, ($P_1$)
— 10,9 — — 100 — ($P_2$)
— 21,8 — — 200 — ($P_3$)
— 43,6 — — 400 — ($P_4$)

L'apport de la quantité voulue de phosphore à chaque échantillon préalablement individualisé, à l'aide d'un processus de dilutions successives dans une petite quantité de terre, avait pour but d'éviter toute erreur d'hétérogénéité dans ces apports. Aux plus faibles fumures, l'addition de P ne représente en effet qu'une faible proportion des réserves préexistantes dans le sol (apports de 5-10 p.p.m., pour des réserves de 100-200 p.p.m.).

De manière générale, ces échantillons étaient ensuite conservés à une humidité correspondant à la capacité au champ et à la température du laboratoire. Dans une expérience annexe, des variations du régime hydrique ont en outre été provoquées : maintien soit à la capacité au champ, soit à $pF = 3.7$, soit à $pF = 4.2$, soit alternances tous les quinze jours de la capacité au champ au $pF4.2$.

Après des durées croissantes allant de deux semaines à deux ans, ces échantillons étaient soumis à deux tests différents :

— dilution isotopique d'une heure par addition de $^{32}PO_4H_3$ sans entraîneur, au rapport sol/solution = 1/4, après agitation d'une journée de la suspension de terre pour mise en équilibre des phases solide et liquide ; ces essais permettaient en même temps de mesurer la concentration en P de la phase liquide (« solution du sol ») ;

— extraction partielle de P par 1 g de résine Dowex 2 × 4 contenue dans un sachet très perméable de « tergal », agitée pendant 24 heures avec les 25 g de terre placés en suspension dans 80 ml d'eau (Cooke et Hislop, 1963 ; Blanchet et Chaumont, 1964 ; Cooke, 1966).

Enfin, une série de dilutions isotopiques en 13 jours a été réalisée après un vieillissement de 18 mois, selon les techniques habituelles (Gachon, 1966).

C. — *Cultures en vases de végétation*

Des cultures de ray-grass italien ont été conduites en petits vases de végétation, selon la méthode de Chaminade (1960), en diluant 400 g de terre par 1 kg de sable afin de favoriser

l'épuisement. Ces cultures ont été réalisées en 1969 et 1970 sur les divers sols additionnés des fumures précédemment indiquées, après des vieillissements respectifs de 3 mois et 15 mois. Les quantités de phosphore absorbées ont été déterminées par l'analyse des plantes.

### D. — *Expérimentations au champ*

Celles-ci ont été conduites depuis 1964, d'une part sur un sol nettement acide assez comparable au n° 1 (tabl. 1), mais très pauvre en phosphore (0,04 p. 1000 $P_2O_5$ assimilable, méthode DYER), d'autre part sur un sol brun légèrement calcaire très voisin du n° 3. Ces expérimentations comportaient les traitements suivants :

— témoin sans engrais phosphatés ;

— apports annuels de 60 kg/ha $P_2O_5$ sous diverses formes, notamment de superphosphate et scories,

— apports annuels de 100 kg/ha $P_2O_5$ sous les mêmes formes,

— apports de 300 kg/ha des mêmes engrais, tous les trois ans.

Les cultures réalisées étaient alternativement : blé-maïs ou sorgho ; sauf accidents climatiques, les rendements obtenus étaient de l'ordre de 40 à 55 q/ha sur les parcelles fertilisées.

## RÉSULTATS OBTENUS

### 1. — *Répercussions du vieillissement sur les résultats des tests de laboratoire*

#### a) *Concentration en phosphore de la phase liquide du sol*

La figure 1 indique les concentrations observées, soit peu après l'apport d'engrais, soit au bout de deux ans de vieillissement ; ces résultats fournissent par ailleurs une indication comparative du pouvoir fixateur de ces sols (GACHON, 1966).

On constate que la teneur en P de la phase liquide a peu évolué au cours du temps dans les deux sols peu calcaire (n° 3) et peu acide (n° 2), où l'on observe même un léger enrichissement probablement dû à une minéralisation de matière organique. Par contre, sur les deux autres sols nettement calcaire (n° 4) ou acide (n° 1), le vieillissement se traduit par un appauvrissement marqué, qui laisse supposer une évolution plus importante en phase solide.

#### b) *Extraction du phosphore par la résine*

La figure 2, qui représente en fonction du temps les quantités de P extraites par la résine sur le sol n° 3, pour les diverses fumures, montre que la perte « d'activité » de l'engrais est surtout intervenue, dans cette terre, au cours du mois qui a suivi l'apport. La quantité extraite reste ensuite sensiblement constante, et fonction de la fumure.

Si l'on compare maintenant les sols entre eux (fig. 3), deux constatations apparaissent :

— la perte d'activité est plus lente dans le sol n° 2, relativement riche et voisin de la neutralité,

— l'évolution se poursuit au cours du temps dans le sol n° 1, nettement acide.

#### c) *Dilutions isotopiques*

Les dilutions isotopiques réalisées en une heure font apparaître un comportement très voisin des divers sols, et confirment l'indication générale donnée par le test résine :

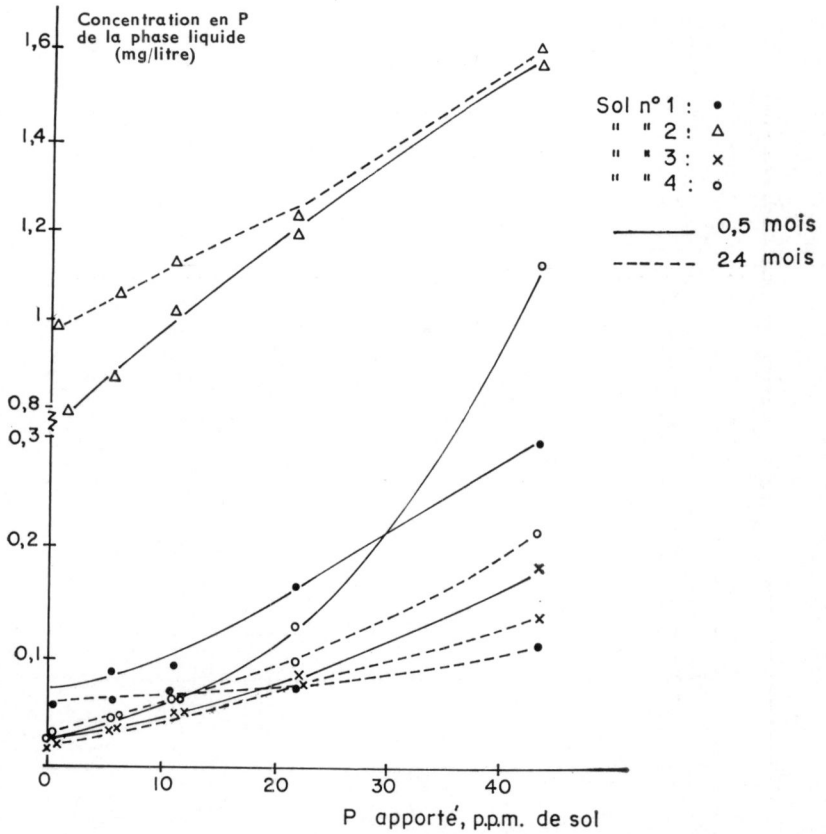



FIG. 1. — *Évolution de la concentration en phosphore de la phase liquide des sols, en fonction des apports*

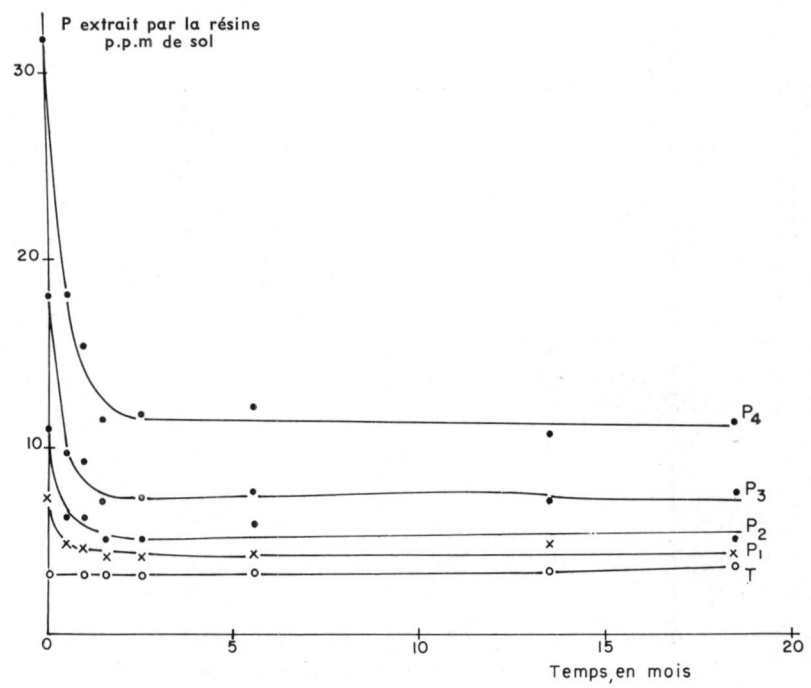



FIG. 2. — *Quantités de phosphore extraites par la résine en fonction du temps, pour les diverses fumures apportées au sol n° 3*

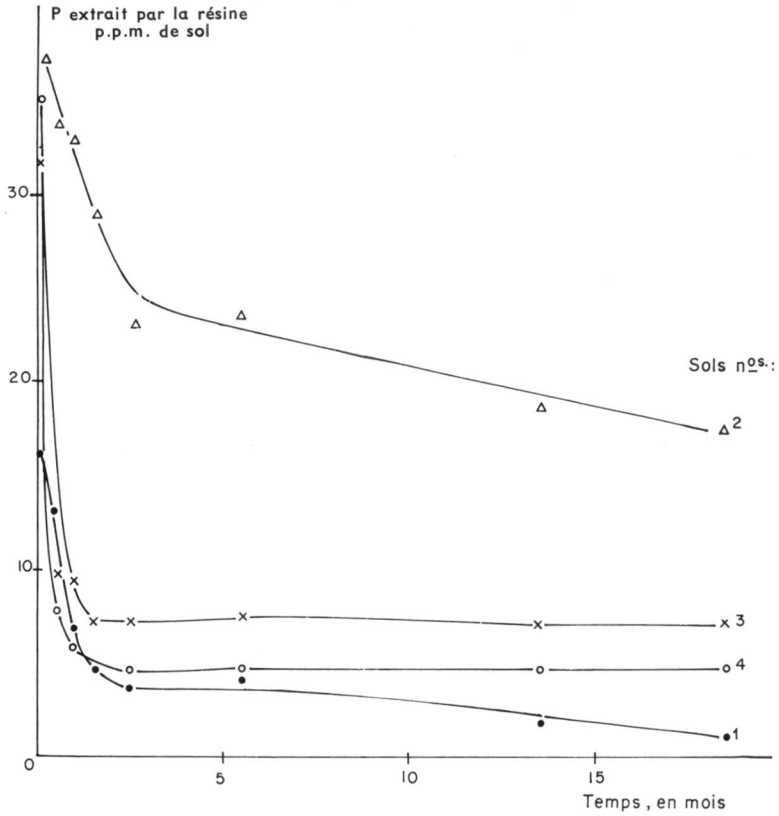



FIG. 3. — *Quantités de phosphore extraites par la résine en fonction du temps, dans les divers sols ayant reçu 21,8 p.p.m. P*

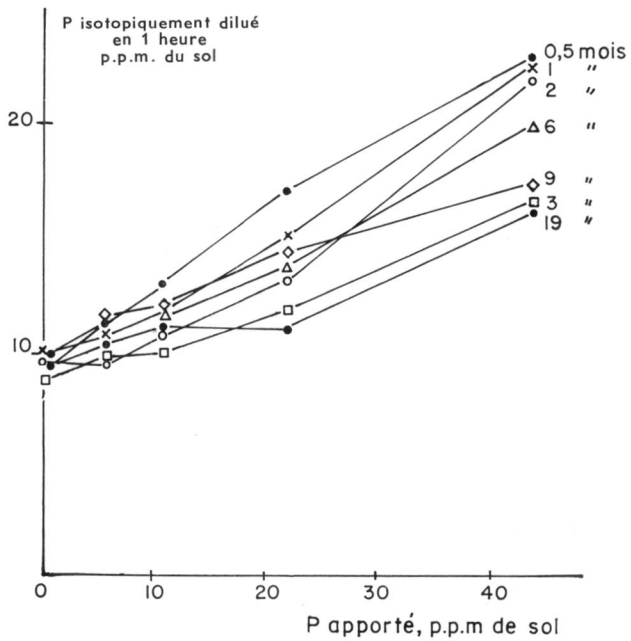



FIG. 4. — *Quantités de phosphore isotopiquement diluées en 1 heure, à divers temps, en fonction des fumures apportées au sol n° 3*

une perte marquée d'activité est intervenue au cours des premiers mois, puis on observe une tendance à la stabilisation (fig. n° 4).

La figure 5 permet de comparer aux apports les quantités de P isotopiquement diluées en 13 jours, après 19 mois de vieillissement. Celles-ci ne représentent toujours qu'environ 50 p. 100 des plus fortes fumures introduites (pour les plus faibles doses d'engrais, l'erreur expérimentale ne permet guère de porter un jugement). Remarquons toutefois que la dilution isotopique n'étant certainement pas terminée au bout de 13 jours, on ne peut conclure à une indisponibilité complète du phosphore non retrouvé par cette technique.

Chacun de ces divers tests de laboratoire apporte donc un éclairage un peu différent, mais il ressort de l'ensemble une indication générale : le vieillissement de l'engrais dans le sol s'est traduit par une perte d'activité, essentiellement intervenue au cours des tout premiers mois qui ont suivi l'apport, et qui semble s'être poursuivie plus lon-

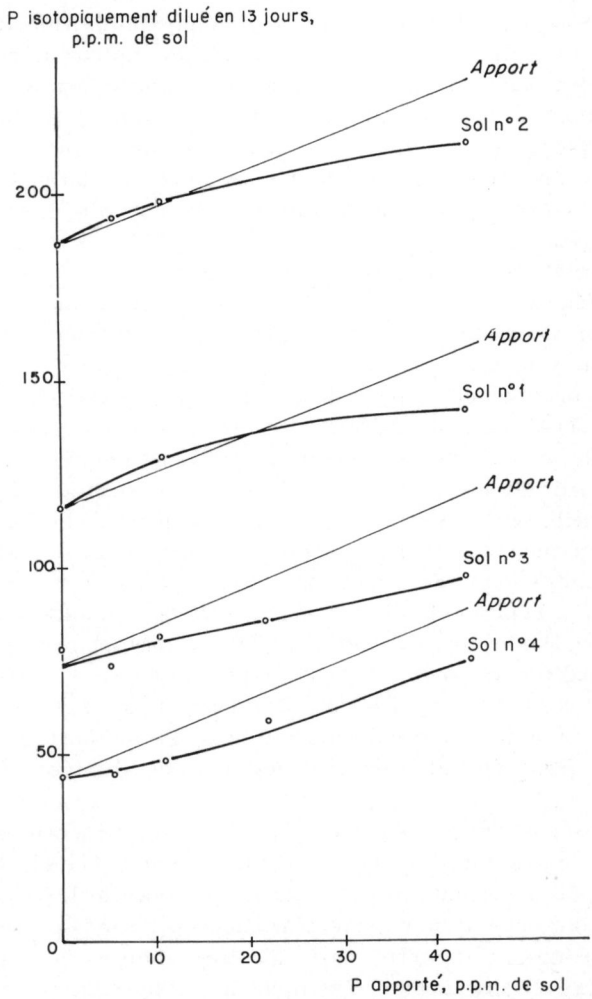



FIG. 5. — *Quantités de phosphore isotopiquement diluées en 13 jours, en fonction des apports réalisés dans les divers sols*

guement dans la terre la plus acide. Mais chaque test ne rend compte que d'un aspect de la disponibilité à l'égard des plantes ; c'est donc à celles-ci que nous nous adresserons maintenant pour mieux juger des effets du vieillissement.

### 2. — *Utilisation de la fumure par les cultures de ray-grass*

La figure 6 indique l'allure de l'absorption du phosphore au fur et à mesure des coupes successives, en 1969 et 1970, sur le sol n° 3. L'action des fumures est manifeste, et, quoique les deux années climatiques aient été quelque peu différentes, les absorptions totales sont comparables ; les plantes étant très carencées en P en fin de culture, les sols pouvaient être considérés comme à peu près épuisés. Nous pouvons donc comparer l'utilisation de ces fumures, après le vieillissement de l'engrais pendant 3 mois ou 15 mois.

Ces résultats sont regroupés sur la figure 7, qui représente, en fonction des apports, les quantités de P absorbées par le ray-grass dans chaque traitement en sus du témoin, c'est-à-dire l'excédent d'absorption qu'a occasionné la fumure. Ce raisonnement ne préjuge naturellement pas de la provenance des ions $PO_4$ absorbés (préexistants dans le sol ou apportés par les engrais), ce qui ne pourrait être déterminé que par d'autres techniques (BLANCHET *et al.*, 1965) ; il s'agit uniquement ici d'un bilan global faisant apparaître les excédents d'absorption par rapport aux témoins sans P, et comparant ces excédents aux apports.

Plusieurs constatations se dégagent de la figure 7 :

— Dans l'ensemble, les courbes représentatives sont peu incurvées ; les processus intervenus au cours du vieillissement n'ont donc pas été considérablement influencés par la dose d'engrais apportée.

— Les récupérations obtenues après 3 mois et 15 mois sont assez voisines dans l'ensemble, et souvent à l'avantage des cultures du traitement 15 mois ; comme l'indiquaient les tests de laboratoire, il n'y a donc généralement pas eu d'évolution marquée après les premiers mois. Le sol nettement acide n° 1 fait cependant exception : de même qu'avec le test résine, le vieillissement se traduit par une nette perte de disponibilité (et aussi par des résultats nettement discordants entre les répétitions, qui laissent supposer des évolutions différentes selon les microhétérogénéités de ce sol).

— Dans la terre n° 2, la plus riche, la récupération excède la fumure, lorsque celle-ci est relativement faible. Dans ce cas, l'apport d'engrais a vraisemblablement stimulé l'établissement de la culture, et par conséquent l'exploration du sol, selon des processus qui ont déjà été mis en évidence (TROCMÉ et DUPRAT, 1958 ; BLANCHET *et al.*, 1961). Il n'y a donc pas là de véritable anomalie et cela ne fait qu'illustrer une fois de plus la nécessité de ne pas préjuger de l'origine des ions $PO_4$ absorbés (réserves initiales ou engrais).

— Dans les autres sols, initialement plus pauvres, la récupération est de l'ordre de 30 à 60 p. 100, au désavantage du sol fortement calcaire n° 4, et de la deuxième année d'exploitation du sol nettement acide n° 1. En ce qui concerne le sol calcaire n° 4, on ne peut dire ici si la récupération relativement faible est due à la présence du calcaire, ou à la pauvreté initiale de cette terre, illustrée notamment par la figure 5. La seconde hypothèse apparaît plus vraisemblable, car la fraction récupérée est plus élevée en présence de la forte fumure que dans le cas des plus faibles apports. Quoi

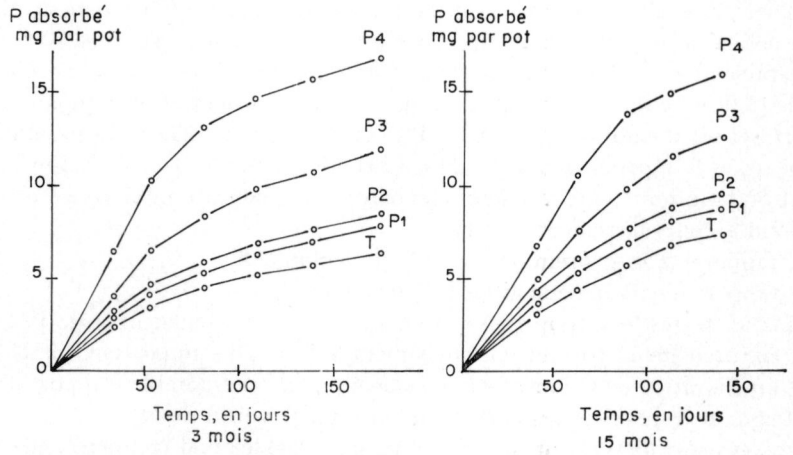



FIG. 6. — *Quantités cumulées de phosphore absorbées par le ray-grass, en fonction du temps, après 3 mois et 15 mois de vieillissement, dans le sol n° 3*

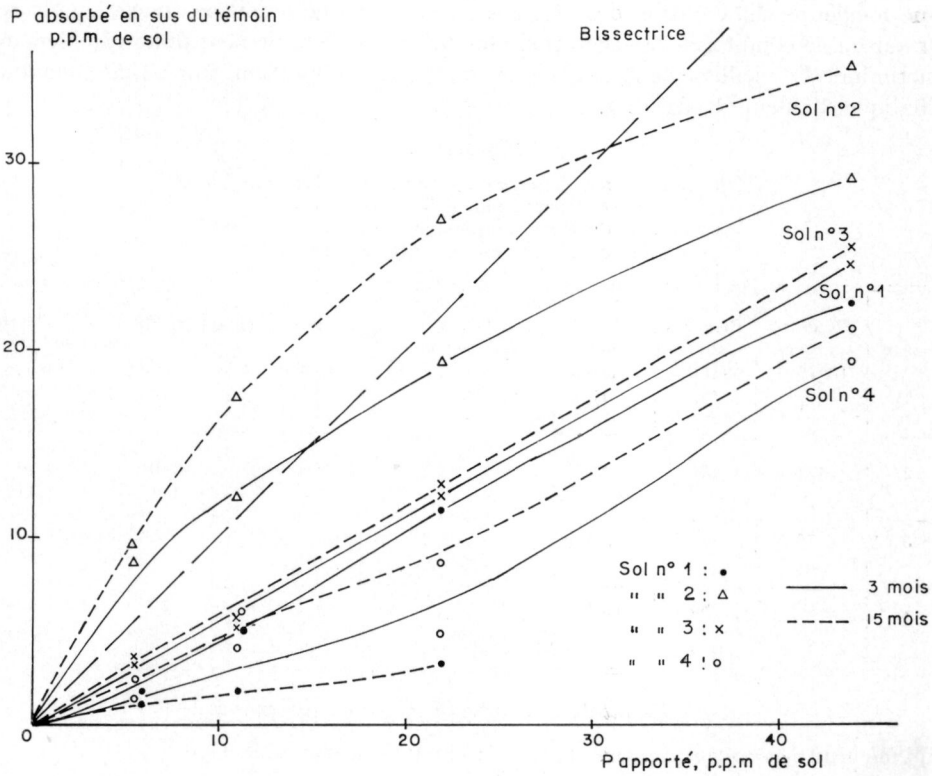



FIG. 7. — *Quantités de phosphore absorbées en supplément des témoins, dans les divers sols, en fonction des apports*

qu'il en soit, le vieillissement ne s'est pas traduit de manière foncièrement différente dans ce sol calcaire, par rapport aux deux terres sensiblement neutres.

Le tableau 2 indique une approche différente du rôle des réserves initiales du sol et de la fumure dans l'alimentation du ray-grass : il permet de comparer, pour le plus fort apport d'engrais (43.6 p.p.m. P), l'enrichissement relatif du sol ainsi réalisé (colonne 4), et la répercussion sur l'alimentation (colonne 8). Dans le sol n° 2, le plus riche, et où la fumure a été la mieux récupérée, l'augmentation relative d'absorption correspond à l'enrichissement réalisé :

— rapports d'absorption de 1,26 et 1,27 (colonne 8),

— rapport d'enrichissement de 1,24 (colonne 4).

Dans les terres beaucoup plus pauvres n° 3 et 4, le même apport d'engrais se traduit naturellement par un enrichissement relatif plus important, mais surtout par une amélioration de l'alimentation beaucoup plus considérable (rapport d'absorption atteignant 6, pour un rapport d'enrichissement voisin de 2).

Dans ces sols pauvres, même si la fumure est assez mal récupérée, elle possède donc une « efficacité alimentaire » très élevée, comme cela a été souvent montré, même au champ (ex. BLANCHET *et al.*, 1965).

Au point de vue du vieillissement de l'engrais, ce tableau semble faire apparaître, sur les sols n° 3 et 4, une diminution dans le temps du rapport d'absorption ; le détail des résultats (colonnes 6 et 7) montre toutefois que ce fait est essentiellement dû à une meilleure alimentation des témoins au cours de la deuxième année de culture, en raison de conditions de végétation plus favorables. On ne peut donc valablement incriminer le vieillissement, du moins dans une proportion importante, comme l'indique d'ailleurs la figure 7.

TABLEAU 2

*Influence respective des réserves initiales du sol et de la fumure sur l'absorption de P par le ray-grass.*
(la quantité de P isotopiquement diluable en 13 jours a été considérée comme réserve initiale).

| Sol n° (1) | Réserves initiales (p.p.m.) (2) | Réserves + fumure (p.p.m.) (3) | P sol fumé / réserves (4) | Durée vieillissement (mois) (5) | P absorbé en p.p.m. de sol | | P absorbé sol fumé / témoin (8) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | témoin (6) | fumé (7) | |
| 2 | 187 | 231 | 1,24 | 3 | 116 | 146 | 1,26 |
| | | | | 15 | 129 | 164 | 1,27 |
| 3 | 75 | 119 | 1,59 | 3 | 9,4 | 34 | 3,62 |
| | | | | 15 | 16 | 37,5 | 2,34 |
| 4 | 45 | 89 | 1,97 | 3 | 3,6 | 22,7 | 6,3 |
| | | | | 15 | 7,8 | 29 | 3,72 |

### 3. — *Résultats des expérimentations au champ*

a) *Sol brun légèrement calcaire* (0,11 p. 1000 $P_2O_5$ assimilable Dyer)

Le tableau 3 indique que ce sol de « terrefort », ayant fait l'objet d'une bonne culture traditionnelle, se situe à la limite de la réaction aux apports d'engrais phos-

phatés ; il n'est pas très riche, mais profond, et labouré assez profondément (30-35 cm). Une baisse de rendements des parcelles témoins devient nette au cours des dernières années de l'expérimentation.

TABLEAU 3

*Indices de comparaison des rendements obtenus en sol brun légèrement calcaire, selon les divers traitements appliqués*
(M = maïs ; B = blé)

| Années | Témoin | Superphosphate, (kg/ha $P_2O_5$) | | | Scories, (kg/ha $P_2O_5$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 60 annuel | 100 annuel | 300 triennal | 60 annuel | 100 annuel | 300 triennal |
| 1964 (M) | 109 | 100 | 103 | 96 | 96 | 104 | 96 |
| 1965 (B) | 93 | 100 | 104 | 104 | 105 | 104 | 104 |
| 1966 (M) | 109 | 100 | 104 | 105 | 112 | 100 | 90 |
| 1967 (B) | 94 | 100 | 107 | 109 | 107 | 107 | 103 |
| 1968 (M) | 85 | 100 | 93 | 89 | 87 | 91 | 91 |
| 1969 (B) | 88 | 100 | 102 | 99 | 106 | 102 | 101 |
| Moyenne | 96 | 100 | 102 | 100 | 102 | 101 | 97 |

Pour faciliter l'interprétation, ces rendements ont été traduits sous forme d'indices de comparaison, en prenant pour base 100 les résultats « 60 $P_2O_5$ du superphosphate » qui représente la restitution largement calculée des exportations des récoltes.

Les principaux faits mis en évidence par le tableau 3 sont les suivants :

— le renforcement de la fumure (100 kg/ha $P_2O_5$), qu'il s'agisse de superphosphate ou de scories, n'a eu qu'un effet négligeable, ce qui est bien compréhensible étant donnée la très faible réaction aux engrais dans ce sol assez bien entretenu dans le passé ;

— l'absence de préjudice sur les témoins, au cours des premières années, indique que les fumures antérieures sont bien demeurées utilisables par les plantes (surtout dans le cas du maïs, semble-t-il). Cette observation est d'ailleurs très classique (TROCMÉ et DELAS, 1960) ;

— dans ces conditions, le blocage de la fumure sur trois ans ne présente pas d'inconvénient appréciable.

Il peut en aller différemment si le sol est moins favorable, ainsi que l'indique l'expérimentation suivante réalisée sur un sol très pauvre de défriche de bois, et nettement acide (pH 5,5).

b) *Sol nettement acide et très pauvre* (0,04 p. 1000 $P_2O_5$ assimilable Dyer)

En faisant appel au mêmes indices de comparaison, le tableau 4 indique les résultats obtenus, et fait apparaître diverses constatations :

— l'effet de fumures croissantes est manifeste, notamment pour les années 1964 et 1967 comportant des apports de 300 kg/ha $P_2O_5$, ce qui indique que la carence devrait d'abord être corrigée (CHAMINADE, 1969). L'importance du préjudice causé aux parcelles témoin varie d'ailleurs d'un an à l'autre, et paraît d'autant plus accusée que les caractères climatiques sont défavorables (forte sécheresse estivale en 1964 ; printemps très humides en 1965 et 1969) ;

TABLEAU 4

*Indices de comparaison des rendements obtenus, selon les divers traitements appliqués, en sol très pauvre nettement acide*

(M = Maïs, B = Blé, S = Sorgho)

| Années | Témoins | Superphosphate, kg/ha $P_2O_5$ | | | Scories, kg/ha $P_2O_5$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 60 annuel | 100 annuel | 300 triennal | 60 annuel | 100 annuel | 300 triennal |
| 1964 (M) | 18 | 100 | 146 | 185 | 96 | 118 | 219 |
| 1965 (B) | 21 | 100 | 97 | 91 | 91 | 100 | 99 |
| 1966 (M) | 66 | 100 | 115 | 89 | 81 | 106 | 84 |
| 1967 (B) | 46 | 100 | 98 | 95 | 101 | 122 | 135 |
| 1968 (S) | 70 | 100 | 106 | 105 | 87 | 106 | 107 |
| 1969 (B) | 20 | 100 | 106 | 73 | 86 | 140 | 74 |
| Moyenne | 40 | 100 | 111 | 106 | 90 | 115 | 119 |

— si la fumure triennale entraîne ici un bénéfice souvent marqué au cours de l'année d'application, selon un effet de correction de carence, elle se traduit au bout de trois ans par une importante chute de rendement, imputable au vieillissement des engrais dans le sol. Dans de telles conditions (peu recommandables d'ailleurs car une fumure de fond s'imposerait), le blocage de l'apport d'engrais ne devrait vraisemblablement pas s'effectuer sur plus de deux ans.

Ces expérimentations confirment donc bien les résultats obtenus en vases de végétation : lorsque un sol voisin de la neutralité a été au préalable suffisamment enrichi, le vieillissement de l'engrais n'entraîne pas une diminution considérable de sa disponibilité à l'égard de la plante. Par contre, l'effet de vieillissement est plus marqué en sol pauvre, et sans doute aussi en sol acide.

### 4. — *Influence du régime hydrique du sol sur le vieillissement*

La concentration des divers ions dans la phase liquide du sol, et par conséquent l'ampleur des réactions susceptibles d'intervenir tant entre ces ions qu'avec la phase solide, est largement fonction de la teneur en eau du sol. Une étude systématique étant assez difficile à réaliser au champ, nous ne l'avons abordée qu'au laboratoire, et le tableau 5 indique les résultats obtenus au cours de l'extraction du phosphore par la résine, selon le régime hydrique appliqué au sol n° 3.

Ces résultats montrent que le vieillissement, tel qu'il peut être apprécié par cette technique, est quelque peu ralenti lorsque la terre est maintenue relativement sèche (pF 4,2). Inversement, l'état humide, ou l'alternance dessication-humectation dans la limite de la réserve hydrique utilisable par les cultures, accélèrent légèrement le processus. Néanmoins, le régime hydrique n'exerce pas une influence considérable et on peut raisonnablement penser que l'évolution des engrais phosphatés en culture irriguée, par exemple, n'est pas très différente de celle qui intervient en culture sèche. Les conclusions sont identiques pour les autres terres étudiées.

TABLEAU 5

*Quantités de phosphore extraites par la résine, au cours du vieillissement, dans le sol n° 3 soumis à quatre régimes hydriques différents.*

| Fumure | Durée de vieillissement mois | P extrait par la résine, p.p.m. de sol | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Capacité au champ | pF 3,7 | pF 4,2 | Alternance cap. champ (pF 4,2) |
| 10,9 p.p.m. P (100 kg/ha $P_2O_5$) | 0,5 | 6,9 | 6,7 | 7,8 | 6,3 |
| | 1 | 6,8 | 6,5 | 7 | 7,1 |
| | 2,5 | 6,2 | 6,1 | 6,5 | 6,3 |
| | 5,5 | 5,3 | 6,2 | 7 | 5,7 |
| | 8,5 | 6 | 5,3 | 7,7 | 6,1 |
| 43,6 p.p.m. P (400 kg/ha $P_2O_5$) | 0,5 | 16,6 | 18,1 | 20,7 | 16,9 |
| | 1 | 16,3 | 16,1 | 21 | 16,5 |
| | 2,5 | 14,7 | 13,9 | 15,6 | 14,1 |
| | 5,5 | 12,1 | 11,7 | 13 | 12,4 |
| | 8,5 | 12,9 | 12,6 | 12,9 | 12,7 |

## DISCUSSION ET CONCLUSIONS

### 1. — *Aspect général et méthodologie*

Cette étude globale de vieillissement est l'un des aspects, très controversé (BARBIER, 1969) de l'évolution des engrais phosphatés dans le sol.

Ce problème intéresse à la fois :

— les chercheurs physico-chimistes, sous l'angle des réactions intervenant au cours de cette évolution,

— les agronomes et les agriculteurs, soucieux de savoir comment varie dans le temps la disponibilité de la fumure à l'égard des cultures.

Le malaise qui règne autour de cette question provient sans doute à la fois de sa complexité et des techniques d'étude utilisables. L'alimentation de la plante met en effet en jeu un très grand nombre de facteurs, qui présentent de multiples interactions entre eux, et il est bien difficile de cerner leur importance respective, même au moyen d'études relativement élaborées.

Prenons un exemple parmi les résultats rapportés ici. On admet couramment, et cette opinion paraît sérieusement fondée, que la quantité de phosphore isotopiquement diluable en un temps raisonnable, tel que les treize jours pratiqués ici, reflète valablement l'ampleur des réserves du sol, sans toutefois en représenter la totalité. Dans nos essais, la dilution isotopique en treize jours permet de retrouver dans les divers sols environ 50 p. 100 des plus fortes fumures apportées (fig. 5). Or, les cultures de ray-grass absorbent, en plus des témoins, des quantités de P représentant approximativement 30 p. 100 à 100 p. 100 de ces fumures, selon la nature et la richesse de ces terres (fig. 7). Malgré tout son intérêt, la dilution isotopique de durée moyenne

s'avère donc insuffisante pour prévoir à elle seule les conditions d'alimentation du végétal, et l'utilisation que pourra faire la plante des engrais apportés. C'est en effet l'ensemble du « pouvoir alimentaire » du sol qui est modifié, et, quoique cette notion soit de mieux en mieux cernée (GACHON, 1970), les données dont on peut disposer ne permettent pas toujours de bien mettre en évidence des écarts modestes, pourtant susceptibles d'influencer le choix de l'agriculteur pour une politique de fertilisation. Aussi, tant que les approches ne seront pas mieux précisées (FARDEAU et MARINI, 1968 ; OLSEN et WATANABE, 1970 ; DREW et NYE, 1970), il nous semble nécessaire de faire preuve d'une grande prudence dans l'interprétation agronomique de ces processus de vieillissement. La plante paraît en effet actuellement le meilleur test de leurs conséquences pratiques, et la méthodologie, fondée sur des études en vases de végétation et des expérimentations au champ, qu'ont adoptée certains Instituts de Recherches, découle de cette constation (CHAMINADE, 1970 a et b).

### 2. — *Indications ressortant de ces études*

Ces réserves étant soigneusement faites, on doit malgré tout noter une concordance certaine entre les résultats fournis par les diverses techniques que nous avons utilisées :

— L'ensemble des tests de laboratoire met en évidence une perte d'activité du phosphate au cours des tout premiers mois qui ont suivi l'apport, puis une stabilisation, sauf dans le sol acide. Cette perte d'activité n'implique pas forcément que le phosphore ne soit plus utilisable par la plante.

— Les cultures de ray-grass ne décèlent pas d'évolution importante entre 3 mois et 15 mois ; elles montrent l'effet d'autant plus prépondérant de la fumure que le sol est plus pauvre, mais l'excédent d'absorption de la plante par rapport aux témoins est alors plus limitée. De même qu'en laboratoire, le vieillissement est peu influencé par la dose apportée.

— D'après tous ces résultats, une évolution défavorable paraît plus à craindre dans certains sols acides qu'en milieu neutre, ou peut-être même calcaire.

L'expérimentation au champ montre enfin qu'en terres suffisament pourvues et ne présentant pas de défauts graves, l'alimentation se satisfait d'apports relativement anciens.

*Pour conclure, quant à la conduite de la fertilisation,* nous pouvons dire que, sur de tels sols, le blocage des fumures sur un petit nombre d'années apparaît possible sans qu'il soit nécessaire de renforcer nettement les doses. Cette pratique peut permettre soit de gagner du temps et de limiter les frais, soit d'assurer l'alimentation de cultures pérennes (prairies...). Une « concentration » de l'engrais phosphaté en certaines zones du profil, découlant de techniques telles que le non-labour, la localisation, etc., ne semble pas gravement dommageable au maintien de l'assimilabilité. Une modification du régime hydrique (irrigation) n'apporte pas non plus de perturbations très marquées.

Le sol très calcaire que nous avons étudié se comporte de manière assez voisine, mais il peut en aller différemment dans d'autres cas (RADET, 1962 ; DUTIL et DUMON, 1967), ou avec l'emploi d'autres formes d'engrais.

Enfin, une plus grande prudence est nécessaire en sols pauvres, surtout s'ils sont acides. Dans ce dernier cas, s'il s'agit de culture assez intensive, il est bien préférable de chauler et d'apporter une fumure de redressement, rejoignant ainsi le cas général

ci-dessus ; la fertilisation d'entretien revêtira alors sa pleine efficacité (CHAMINADE, 1970 a). En exploitation extensive ou semi-extensive (pâcages...), réalisée au minimum de frais, on ne peut que conseiller de procéder à des apports pas trop espacés, si l'on désire obtenir une certaine régularité de production.

*Reçu pour publication en juin 1971.*

## SUMMARY


### AGEING OF PHOSPHATIC FERTILIZERS IN THE SOIL AND FERTILIZATION CONTROL

The term « ageing » herein refers to the entire development of a phosphatic fertilizer in the soil and in the course of time. We did not investigate the physico-chemical reactions that took place but merely attempted to make a global estimation the effects of such processes on fertilization.

Three methods were employed, as follows :

1. Laboratory tests (isotopic dilutions, resin extraction, P concentration in the liquid phase). These evinced that activity of the phosphorus brought in by the fertilizer decreases substiantally over the very first months, this effect depending on the fertilizer used. Next, near-stabilization takes place, save in the acid soil investigated.

2. Ray-grass, grown in small test receptacles, controlled after periods of three and fifteen months, does not undergo important charges between the two periods, the amount of fertilizer used scarcely affecting ageing.

3. Experimentation in the field indicates that, in a properly husbanded, slightly calcareous brown earth, the feeding of the plants takes effect normally even when fertilization took place some time back.

The ageing of the fertilizer is much more marked in acid and very lean soils.

These methodological investigations are discussed from the agronomical angle without giving howerer a better interpretation of these processes than the laboratory tests which provide but some facets of plant-feeding factors.

To conclude, results relating to new cultural techniques are examined in connection with year-round fertilization, location, no ploughing and irrigation.


## ZUSAMMENFASSUNG


### ALTERUNG VON PHOSPHATDÜNGERN IM BODEN UND DER DURCHFÜHRUNG MELIORATION

« Alterung » wird hier im Sinne der zeitbedingten Gesamtevolution eines Phosphatdüngers im Boden verstanden ; eine Untersuchung der dabei auftretenden physikalisch-chemischen Reaktionen fand nicht statt, es wurde lediglich den Versuch unternommen, ingesamt die Folgen dieser Vorgänge für die Bodenverbesserung zu beurteilen.

Folgende drei Verfahren wurden angewandt :

1. Laboratoriumsteste (isotopische Verdünnungen, Auszüge über ein Austauscherharz, Bestimmung der P-Konzentration in der flüssigen Phase) zeigen eine deutliche Verminderung der durch den Dünger eingebrachten Phosphor aktivität im Verlauf der ersten Monate gleich nach der Zufuhr. Es folgt anschliessend eine ungefähre Stabilisierung, ausgenommen im untersuchten sauren Boden.

2. Ueber drei sowie ueber fünfzehn Monate ausgedehnte Alterungsversuche an Ray-grass-Kulturen in kleinen Versuchstöpfen zeigten keine deutliche Evolution zwischen diesen beiden Zeitspannen. Die zugeführte Düngerdosis beeinflusst die Alterung nur wenig.

3. Untersuchungen im Versuchsfeld zeigten dass in einem regelmässig unterhaltenen, braunen, leicht kalkhaltigen Boden, die Ernährung der Pflanzen, aus relativ alten Düngungen, normal vor sich gehen kann. Die Alterung des Düngers hat viel wesentlichere Rückwirkungen in einem armen, sauren Boden.

Die Methodik dieser Untersuchungen wird anschliessend vom agrarwissentschaftlichen Standpunkt aus diskutiert, wobei es zu keiner besseren Beurteilung dieser Vorgänge kommt als bei den verschiedenen Laboratoriumsuntersuchungen, die die vorhandenen Ernährungsfaktoren nur teilweise beleuchten.

Abschliessend werden die Ergebnisse neuer Anbaumethoden besprochen, wie mehrjährige Düngungen, örtliche Begrenzungen, Verzicht auf Pflügen, Bewässerung.

## РЕЗЮМЕ

Старение фосфорных удобрений в почве и проведение удобрения.

Р. БЛАНШЕ, М. БОСК, Н. ЖЕЛЬФИ, А. ХИЛЕР.

Термин «старение» — применяется в данном труде, для обозначения общности эволюции фосфорного удобрения в почве, во времени; не проводилось никакого специального изучения происходивших химических реакций, и сделана только попытка, охарактеризования общих последствий этого процесса в отношении удобрения почв.
Употреблялись три различных подхода :

1. Лабораторные тесты (изотопическое разбавление, экстрагирование при помощи смол, концентрация фосфора в жидкой фазе...) указывают на сильное понижение активности фосфора удобрений в течении самых первых месяцев по внесении. Затем в почвах наступает относительная стабилизация, за исключением изучавшейся кислой почвы.

2. Культуры рай-грасса проводившиеся в небольших вегетационных сосудах, после от 3-х до 15-тилетнего старения удобрения, не показывают никакой заметной эволюции в течении этого промежутка времени. Доза внесенного удобрения не оказывает почти никакого влияния на его старение.

3. Полевые опыты доказывают что в коричневой, слегка известковой и хорошо окультуренной почве, питание культур может протекать нормально, за счет сравнительно старых удобрений. Старение удобрения отражается более резко в почвах бедных и кислых.

Затем рассматривается, с агрономической точки зрения, методология данного изучения и ставится вопрос не может-ли само растение быть лучшим судьей, чем разнообразные лабораторные изучения, отображающие только частичные аспекты факторов питания.

И, в заключение, разбираются новые технические приемы культур : многолетние подкормки, локализация удобрений, культуры без вспашки, ирригация...

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arvieu J.-C., 1969. Les minéraux phosphatés du sol. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol.*, **4**, 5-16.

Barbier G., Chabannes J., 1949. Sur le mécanisme de l'adsorption des phosphates par divers constituants des argiles des sols *Ann. agron.*, **3**, 341-379.

BARBIER G., 1969. Applications des isotopes à l'étude des relations sol-plante. *Commissariat à l'Énergie Atomique* (B. I. S. T.), **141**, 21-30.

BLANCHET R., CHAUMONT C., PÉRIGAUD S., 1961. Influence de l'ampleur et de la disponibilité des réserves minérales des sols sur la vitesse d'utilisation de ces réserves par les plantes. *C. R. Acad. Sci.*, **252**, 597-599.

BLANCHET R., CHAUMONT C., 1964. Quelques aspects de la désorption et des mouvements d'ions phosphoriques dans le sol, et de leur participation à l'alimentation des plantes. *Ann. agron.*, **15**, 519-538.

BLANCHET R., MORIZET J., CHAUMONT C., MAERTENS C., 1965. Quelques exemples de l'utilisation d'un engrais phosphaté radioactif pour l'étude de l'alimentation phosphorique des plantes dans le sol. *Ann. agron.*, **16**, 535-551.

BLANCHET R., MAERTENS C., MARTY J.-R., GELFI N., 1966. Influence des constituants minéraux de quelques types de sols sur leur propriétés physiques et leurs possibilités culturales. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol.*, **9**, 257-274.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petites vases de végétation. *Ann. agron.*, **11**, 121-134.

CHAMINADE R., 1969. Fertilisation des sols tropicaux. *Coopération technique*, **56-57**, 2-6.

CHAMINADE R., 1970 *a*. Rôle de la fertilisation dans l'intensification de la production agricole : nutrition des plantes en relation avec le sol. *IX^e Congrès de l'Institut International de la Potasse*, Antibes (en cours d'impression).

CHAMINADE R., 1970 *b*. Travaux exécutés par l'I. R. A. T. en matière d'agronomie. *Agron. Trop.*, **25**, 1-17.

COOKE I. J., HISLOP J., 1963. Use of anion-exchange resin for the assessment of available soil phosphate. *Soil Sci.*, **96**, 308-312.

COOKE I. J., 1966. A kinetic approach to the description of soil phosphate status. *J. Soil Sci.*, **17**, 56-64.

DEMOLON A., BARBIER G., 1930. Contribution à l'étude de l'évolution des phosphates solubles dans les sols minéraux. *Ann. agron.*, **3**, 329-363.

DEMOLON A., 1952. *La dynamique du sol*. Dunod, Paris.

DREW M. C., NYE P. H., 1970. The supply of nutrient ions by diffusion to plant roots in soils. III. Uptake of P by roots of onion, leck and ray-grass. *Plant and Soil*, **33**, 545-564.

DUTIL P., DUMON J. C., 1967. Résultats d'une étude de fertilisation phosphatée en sol très calcaire. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol.*, **6**, 27-35.

FARDEAU J.-C., MARINI P., 1968. Détermination, par échange isotopique en retour, du compartiment des ions-phosphates les plus mobiles du sol. *C. R. Acad. Sci.* Paris, **267**, 427-430.

GACHON L., 1966. Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C. R. Ac. agric.*, **52**, 1108-1116.

GACHON L., TRIBOI E., 1970. Contrôle et évolution de la fertilité phosphorique de sols soumis à des essais de longue durée. *C. R. Acad. agric.*, **56**, 501-511.

GERVY R., 1970. *Les phosphates et l'Agriculture*. Dunod, Paris.

LARSEN S., GUNARY D., SUTTON C. D., 1965. The rate of immobilization of applied phosphate in relation to soil properties. *J. Soil Sci.*, **16**, 141-148.

LINDSAY W. L., MORENO E. C., 1960. Phosphate phase equilibria in soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 177-182.

MARTY J.-R., FIORAMONTI S., 1970. Comparaison de diverses rotations sur sol limoneux mal structuré; effet améliorant des cultures fourragères. *Ann. agron.*, **21**, 269-286.

OLSEN S. R., WATANABE F. S., 1970. Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. *Soil Sci.*, **110**, 318-327.

RADET E., 1962. Contribution à l'étude du comportement des engrais phosphatés dans les sols de craie. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol.*, **5**, 287-305.

TROCMÉ S., DUPRAT A., 1958. Sur la fumure phosphatée en culture maraîchère intensive. *C. R. Acad. agric.*, **44**, 635-639.

TROCMÉ S., DELAS J., 1960. Action des engrais phosphatés et bilan du phosphore au cours d'une expérience culturale de treize années. *C. R. Acad. agric.*, **46**, 81-89.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (6), 705-716.

# LIBÉRATION DU POTASSIUM PAR LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES DU SOL EN PRÉSENCE DE TÉTRAPHÉNYLBORATE DE SODIUM

B. CABIBEL

*Station d'Agronomie, I. N. R. A.,*
*84 - Montfavet*

## RÉSUMÉ

La libération du potassium par les fractions granulométriques du sol a été étudiée au moyen du réactif NaCl-NaTPB. L'étude a porté sur 16 échantillons de sol différents quant à leur origine ou à l'entretien de leur niveau potassique.

Après séparation des diverses fractions, elles sont mises en contact pendant 120 heures avec le réactif NaCl-NaTPB. Les quantités de K libérées pour 100 g de fraction croissent dans l'ordre : sable, limon, argile.

L'importance des fractions dans la libération du K par l'ensemble du sol est fonction de la composition granulométrique de celui-ci. Les quantités libérées par les limons ou même par les sables peuvent avoir une importance non négligeable.

## INTRODUCTION

De nombreux auteurs ont étudié au moyen du réactif NaTPB la libération du K de minéraux argileux, pris comme modèles simples, afin de mieux connaître les mécanismes qui déterminent la libération du K par le sol (SCOTT *et al.*, 1960 et 1962 ; REED *et al.*, 1962 et 1966 ; SCOTT, 1968). Par contre, la libération de K par les fractions granulométriques extraites du sol a fait l'objet de peu de travaux (SMITH *et al.*, 1968), ceux-ci se limitant aux fractions argileuse et limoneuse, étudiées indépendamment du sol origine.

Nous remercions les Stations d'Agronomie d'Amiens et de Dijon (I. N. R. A.), la Société Commerciale des Potasses et de l'Azote (S. C. P. A.), la Compagnie d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc (C. N. A. B. R. L.), le Syndicat des Riziculteurs d'Arles, qui nous ont fourni les échantillons de sols de leurs dispositifs expérimentaux.

Dans le présent travail, nous examinerons la libération du K par les fractions granulométriques extraites de divers sols, et nous évaluerons la participation respective de chacune d'elles dans la libération globale de K par l'échantillon de sol.

## I. — MATÉRIEL ÉTUDIÉ

### 1. 1. — *Fractions granulométriques*

La nature et les dimensions limites caractérisant les fractions étudiées sont :

1. Argiles fines : $\varnothing < 0{,}5\ \mu$
2. Argiles grossières : $0{,}5\ \mu < \varnothing < 2\ \mu$
3. Argiles totales : $\varnothing < 2\ \mu$
4. Limons : $2\ \mu < \varnothing < 50\ \mu$
5. Sables : $50\ \mu < \varnothing < 2\,000\ \mu$

### 1. 2. — *Sols*

Les sols étudiés ont des origines géographiques très différentes. Ils proviennent généralement de dispositifs expérimentaux de longue durée, mis en place pour l'étude de la fertilisation potassique. Sauf indication contraire, les échantillons prélevés représentent l'horizon de surface couramment travaillé.

1. 21. *Sols d'alluvions de la Durance et de la basse vallée du Rhône.*

Ces sols d'alluvions récentes, fines, et très riches en $CaCO_3$, supportent des cultures variées.

a) *Sol maraîcher de la région Noves-Châteaurenard*, recevant de fortes fumures minérales.

$M_s$ = 0-20 cm
$M_{s/s}$ = 20-40 cm

b) *Rizière expérimentale du Domaine Saint-Paul* (I. N. R. A. Montfavet), où la fertilisation K est sans effet sur les rendements.

$R_s$ = Parcelle recevant depuis 1954, 240 unités $K_2O$/ha/an
$Ro_s$ = Parcelle témoin sans apport potassique.

c) *Prairie Saint-Paul.*

$SP_s$ prélevé sur un sol en prairie depuis 80 ans, contigu à la rizière expérimentale et constituant le témoin original zéro.

d) *Rizière expérimentale de Beauchamp près d'Arles*, où dans un essai NK mis en place en 1962, on n'observe aucune réponse à la fertilisation potassique.

$K_0N_1$ = parcelle témoin
$K_1N_1$ = parcelle 100 unités $K_2O$/ha/an
$K_2N_1$ = parcelle 200 unités $K_2O$/ha/an

1. 22. *Sols de la Costière du Gard.*

Ces sols correspondent à un lœss décarbonaté, décalcifié et soliflué, défini comme sol brun de lehm et surmontent les cailloutis de la surface post-villafranchienne. Les échantillons de sols prélevés au domaine d'Asport de la C. N. A. B. R. L. correspondent à l'horizon de surface de deux parcelles d'un dispositif expérimental mis en place en 1962.

Sur plantes maraîchères, on observe actuellement une différence de 30 p. 100 entre les deux traitements extrêmes :

$T_1$ = parcelle 100 unités $K_2O$/ha/an
$T_6$ = parcelle 300 unités $K_2O$/ha/an

1. 23. *Sols de limon de la Somme.*

Ces sols représentent des essais de longue durée installés en 1953 et 1957 à Allonville et Omiécourt sur grande culture. La réponse aux apports de K est positive à Omiécourt, nulle à Allonville.

$Al_0Om_0$ = parcelles témoins
$Al_2Om_3$ = parcelles enrichies (quantités cumulées reçues = 3 000 unités $K_2O$/ha)

1. 24. *Sols granitiques à deux micas de la Pierre-qui-Vire* (Yonne).

Dans un essai établi en 1958 sur prairie temporaire présentant un déficit en potasse, on observe une forte réponse aux apports de K.

$V_0$ = parcelle témoin
$V_M$ = parcelle 150 unités $K_2O$/ha/an

Les principales caractéristiques physiques et chimiques de ces sols sont rassemblées dans le tableau 1.

## II. — MÉTHODES D'ÉTUDES UTILISÉES

### 2. 1. — *Séparation des diverses fractions granulométriques*

On opère sur une quantité de sol suffisante pour obtenir de 4 à 6 g d'argile. Après percolation du sol par 250 ml d'acétate de sodium normal suivie de lavage à l'eau distillée, on disperse le sol par agitation en présence d'une solution d'hexamétaphosphate de Na. La séparation des diverses fractions argileuses est alors obtenue par centrifugation. Après lavage à l'eau des fractions séparées, celles-ci sont obtenues par évaporation de la phase aqueuse à 50°C sous vide. Les argiles -Na sont alors séchées à 100°C à l'air et broyées.

Les fractions supérieures à 2 $\mu$ sont obtenues, après épuisement des argiles, par décantation, lavage à l'eau, séchage à 100°C à l'air et tamisage.

### 2. 2. — *Analyse chimique des fractions*

Les méthodes d'études du K total et du K extractible au NaCl-NaTPB utilisées sont les suivantes :

1. *K total.* — La teneur en K total de l'ensemble des fractions granulométriques et des sols d'origine est déterminée selon la méthode de JACKSON, par attaque de 0,1 g de matière finement broyée par un mélange perchlorique-fluorhydrique. Le contrôle de ces déterminations, effectuées en double, est obtenu par adjonction à toutes les séries, d'échantillons-standards dont la teneur en K total est connue.

2. *K extractible au NaCl-NaTPB.* — Le K est extrait par agitation continue de 250 mg d'argile, 500 mg de limon ou de sable, en présence de 20 ml d'une solution 1,5 N NaCl contenant 1 méq. de tétraphénylborate de Na. Les temps d'agitation varient de 1 à 120 heures. Les agitations sont effectuées dans une enceinte dont la température est maintenue à 20°C.

Après blocage des sites de fixation pour K de la fraction considérée par l'acétate d'ammonium normal, le K TPB est solubilisé à l'aide d'acétone 75 p. 100. Le K extrait est alors dosé dans le filtrat selon la méthode de SCHULTE et COREY (1963).

## III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tous les résultats concernant le potassium total ou extrait par le réactif sont exprimés en méq. de K pour 100 g de la fraction considérée. Pour le K extractible, seuls seront donnés les résultats obtenus avec un temps de contact de 120 heures avec le réactif au tétraphénylborate.

TABLEAU I

*Caractéristiques physiques et chimiques des sols*

| | $M_s$ | $M_{s/s}$ | $R_s$ | $Ro_s$ | $SP_s$ | $K_0N_1$ | $K_1N_1$ | $K_2N_1$ | $T_1$ | $T_6$ | $Al_0$ | $Al_2$ | $Om_0$ | $Om_3$ | $V_0$ | $V_M$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Teneurs en p. 100* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Argile | 13,6 | 16,1 | 25,5 | 25,0 | 25,0 | 32,0 | 33,0 | 37,0 | 18,5 | 15,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 11,0 |
| Limon fin | 22,9 | 26,0 | 35,5 | 34,0 | 41,0 | 53,0 | 53,0 | 51,0 | 19,5 | 23,0 | 26,5 | 27,5 | 27,5 | 28,5 | 14,0 | 16,0 |
| Limon grossier | 51,5 | 30,0 | 23,7 | 24,0 | 19,0 | 8,4 | 7,4 | 7,2 | 39,7 | 40,7 | 54,9 | 53,8 | 54,5 | 53,5 | 7,3 | 7,6 |
| Sable fin | 5,5 | 21,0 | 9,9 | 10,0 | 10,0 | 1,8 | 1,6 | 1,8 | 19,1 | 18,4 | 3,8 | 3,5 | 4,4 | 4,2 | 9,6 | 8,1 |
| Sable grossier | 4,0 | 4,0 | 1,4 | 3,0 | 3,0 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 5,2 | 4,2 | 0,6 | 0,8 | 0,5 | 0,7 | 53,5 | 54,0 |
| Calcaire total | 46,5 | 46,9 | 38,5 | 38,0 | 37,5 | 34,5 | 35,6 | 35,0 | — | — | 1,5 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | — | — |
| Calcaire actif | 9,5 | 10,3 | 13,5 | 13,0 | 13,5 | 20,8 | 21,1 | 21,0 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| pH ($H_2O$) | — | — | — | — | — | — | — | — | 6,6 | 6,1 | 7,90 | 7,85 | 8,10 | 8,10 | 5,5 | 5,6 |
| pH (KCl) | — | — | — | — | — | — | — | — | 6,4 | 5,9 | 7,20 | 7,20 | 7,40 | 7,40 | 5,1 | 5,2 |
| Matières organiques | 4,00 | 2,00 | 3,20 | 3,40 | 3,00 | 2,40 | 2,30 | 2,45 | 1,56 | 1,60 | 2,00 | 2,060 | 2,20 | 2,20 | 1,45 | 1,50 |
| K échang. en méq. p. 100 g de sol | 0,83 | 0,60 | 0,27 | 0,26 | 0,15 | 0,48 | 0,49 | 0,51 | 0,30 | 0,37 | 0,28 | 0,59 | 0,18 | 0,32 | 0,12 | 0,20 |
| K total en méq. p. 100 g de sol | 24,30 | 24,25 | 32,74 | 30,18 | 32,48 | 33,25 | 33,25 | 33,30 | 39,13 | 39,90 | 44,50 | 45,52 | 44,24 | 45,0 | 103,6 | 106,1 |
| K extractible NaCl-NaTPB en méq. p. 100 g de sol | 6,87 | 6,67 | 10,40 | 9,49 | 8,85 | 14,18 | 14,38 | 13,47 | 3,58 | 4,12 | 4,35 | 5,37 | 4,09 | 5,63 | 3,90 | 4,80 |

TABLEAU 2

*Teneurs en K total des fractions granulométriques et des sols correspondants*
(en méq. pour 100 g de la fraction ou du sol)

| | Sols | Sables | Limon | Argiles totales |
|---|---|---|---|---|
| $M_s$ | 24,30 | 26,58 | 19,78 | 58,82 |
| $M_{s/s}$ | 24,25 | 26,03 | 19,50 | 57,66 |
| $R_s$ | 32,74 | 26,53 | 25,43 | 57,54 |
| $Ro_s$ | 30,18 | 26,45 | 24,85 | 54,28 |
| $SP_s$ | 32,48 | 30,03 | 24,55 | 58,75 |
| $K_0N_1$ | 33,25 | 24,53 | 20,16 | 64,52 |
| $T_1$ | 39,13 | 22,40 | 30,10 | 59,55 |
| $T_6$ | 39,90 | 22,34 | 30,26 | 66,70 |
| $Al_0$ | 44,50 | 21,63 | 30,38 | 66,60 |
| $Om_0$ | 44,24 | 21,75 | 32,97 | 71,10 |
| $V_0$ | 103,60 | 129,33 | 67,20 | 37,34 |

Les teneurs en potassium total des échantillons globaux de sol et des fractions granulométriques sont reportées sur les tableaux 1 et 2.

### 3. 1. — *Quantités de K libérées par les diverses fractions*

Les quantités de K libérées après un temps de contact de 120 heures avec le réactif NaCl-NaTPB sont rassemblées au tableau 3. Elles sont également exprimées en p. 100 du K total des fractions correspondantes.

Les résultats obtenus pour certains échantillons pour des temps de contact inférieurs, ont été reportés sur la figure 1 pour faire apparaître le cas échéant, le comportement particulier des fractions provenant de certains sols.

L'examen des résultats montre que pour un sol donné les quantités absolues de K libérées à 120 heures sont fonction des dimensions de la fraction granulométrique et indépendantes de la teneur en K de celle-ci.

Les quantités extraites croissent toujours dans l'ordre suivant :

sable — limon — argile fine — argile totale — argile grossière

La même progression s'observe lorsque les quantités de K extraites sont exprimées en valeur relative, par rapport à la teneur totale de la fraction.

Le classement général obtenu par ordre croissant de libération du K pour les diverses fractions granulométriques est en accord avec celui indiqué dans les études antérieures (Scott, 1958 ; Smith *et al.*, 1958), qu'il s'agisse des sables, des limons et des argiles totales, ou qu'il s'agisse des trois classes argileuses. *Il existe donc une relation entre les quantités de K extraites et la taille des fractions étudiées, le maximum de libération étant obtenu pour les argiles grossières* (0,5 µ-2 µ).

TABLEAU 3

*Quantités de K libérées par les fractions granulométriques des sols en présence de NaCl-NaTPB pour un contact de 120 heures*

| | K en méq. p. 100 g de la fraction | | | | | K en p. 100 du K total de la fraction | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sables | Limons | Argiles totales | Argiles grossières | Argiles fines | Sables | Limons | Argiles totales |
| $M_s$ | 2,94 | 4,14 | 22,76 | 27,69 | 16,62 | 11,1 | 20,9 | 38,9 |
| $M_{s/s}$ | 2,67 | 3,17 | 21,86 | 27,03 | 15,79 | 9,1 | 20,9 | 37,9 |
| $R_s$ | 2,14 | 5,80 | 27,85 | 30,94 | 20,97 | 8,1 | 22,8 | 48,4 |
| $Ro_s$ | 2,27 | 5,31 | 24,81 | 28,52 | 18,09 | 8,6 | 20,9 | 45,7 |
| $SP_s$ | 2,72 | 5,47 | 17,47 | 23,40 | 10,61 | 9,1 | 22,3 | 29,7 |
| $K_0N_1$ | 7,14 | 8,18 | 26,85 | 28,23 | 25,52 | 29,1 | 40,6 | 41,6 |
| $K_1N_1$ | — | 8,54 | 28,33 | 29,87 | 26,90 | — | — | — |
| $K_2N_1$ | — | 8,39 | 26,85 | 27,31 | 26,52 | — | — | — |
| $T_1$ | 0,66 | 1,78 | 14,10 | 28,35 | 7,38 | 2,9 | 5,9 | 23,7 |
| $T_6$ | — | 1,58 | 17,77 | 29,41 | 13,60 | — | 5,2 | — |
| $Al_0$ | 1,48 | 2,04 | 21,73 | 33,14 | 17,13 | 6,8 | 6,7 | 32,6 |
| $Al_2$ | — | 2,17 | 29,87 | 42,63 | 24,03 | — | — | — |
| $Om_0$ | 1,53 | 1,79 | 22,50 | 35,29 | 16,82 | 7,0 | 5,4 | 31,6 |
| $Om_3$ | — | 1,84 | 33,24 | 47,05 | 26,92 | — | — | — |
| $V_0$ | 1,33 | 8,08 | 10,56 | 18,82 | 5,06 | 1,0 | 12,0 | 28,3 |
| $V_M$ | — | 8,52 | 10,92 | 19,48 | 5,21 | — | — | — |

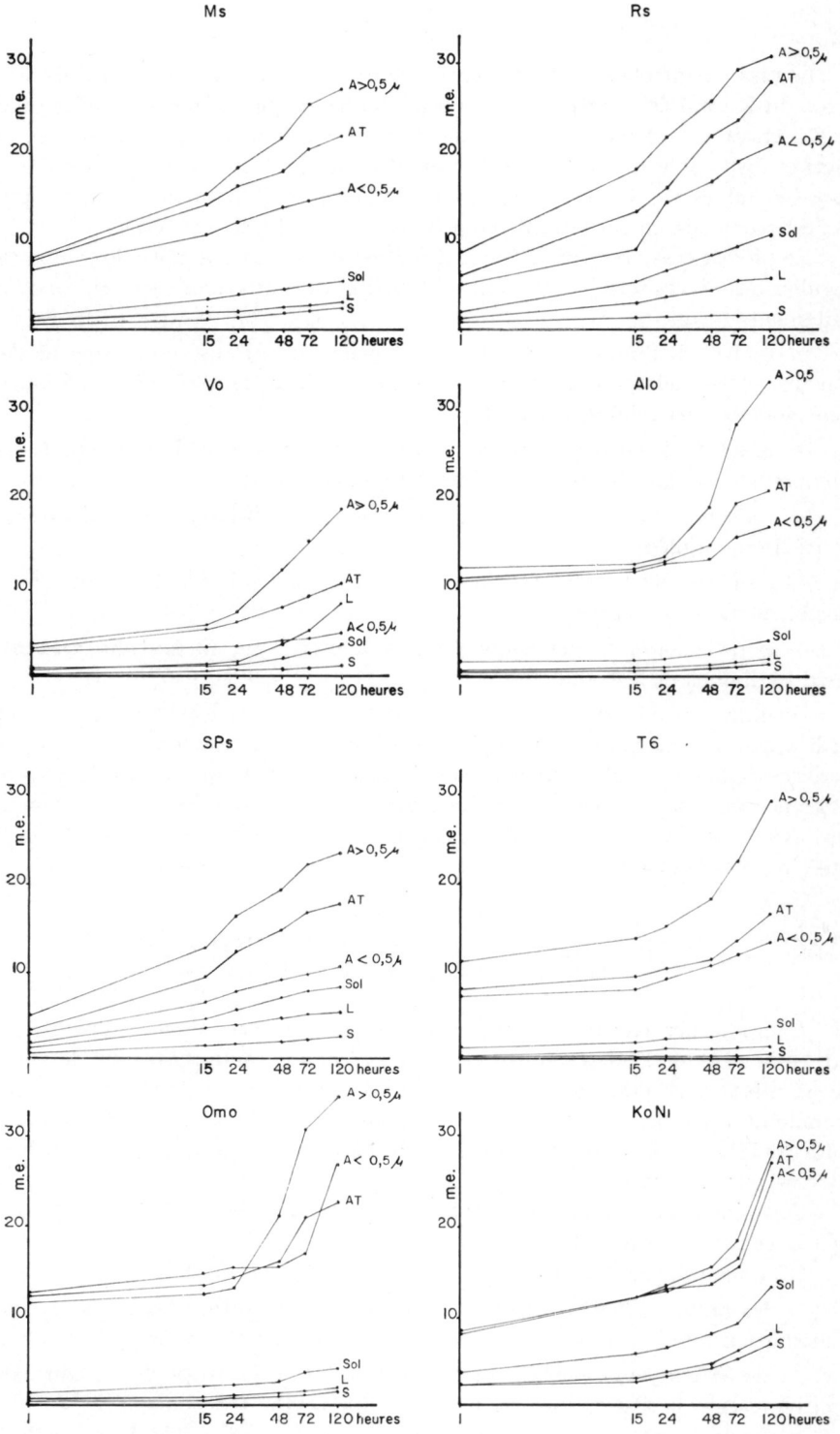



Fig. 1. — *K libéré en présence de NaCl- Na TPB par les fractions granulométriques des sols étudiés*
(K en méq. p. 100 g de la fraction)

Le classement obtenu étant identique lorsqu'on exprime les quantités de K en p. 100 du K total des fractions, pour un sol donné, on peut conclure que les quantités de K extraites sont indépendantes des teneurs en K total des fractions et que la fraction disponible du K total est proportionnellement plus importante lorqu'on passe des sables aux limons et des limons aux argiles d'un même sol. Cette progression est particulièrement sensible pour le sol $V_0$ de la Pierre-qui-Vire.

En plus de ces observations générales, il est intéressant de noter le comportement singulier des divers sols étudiés, soit en fonction de leur origine, soit en fonction des traitements reçus :

— les sols d'alluvions de la Durance forment un groupe homogène (à l'exception du sol Beauchamp), où la libération du K diminue graduellement lorsque la dimension des particules augmente;

— le sol de Beauchamp a un comportement singulier : la libération du K est relativement élevée dans les fractions limoneuse et sableuse;

— les sols de la Costière du Gard présentent une différence très marquée entre les fractions argileuse et limoneuse;

— dans les sols de la Somme, les limons et les sables libèrent des quantités de K sensiblement équivalentes;

— pour le sol de la Pierre-qui-Vire, la différence est au contraire très marquée entre les limons et les sables;

— dans les échantillons provenant de dispositifs expérimentaux, la libération du K apparaît parfois légèrement plus élevée dans la fraction limoneuse des parcelles fertilisées. Mais en règle générale, c'est la fraction argile qui accuse la plus grande différence de comportement entre les deux types de parcelles. C'est notamment le cas des sols de la Costière du Gard et des sols de la Somme. Pour les sols de la Pierre-qui-Vire, au contraire, l'enrichissement n'apparaît sur aucune fraction.

### 3. 2. — *Importance relative des diverses fractions dans la libération globale du K du sol*

L'importance relative des fractions granulométriques dans la libération du K par l'ensemble de l'échantillon de sol correspondant est reportée sur le tableau 4. Ces résultats sont obtenus à partir des données du tableau 1 donnant la composition granulométrique des sols et la quantité de K extractible du sol entier par le réactif NaCl-NaTPB, et à partir des données du tableau 3 donnant les quantités de K libérées par chaque fraction.

Cette importance relative des fractions est rappelée sur la figure 2 pour les principaux échantillons de sol.

L'examen de ces résultats montre que *pour les sols étudiés* :

— les argiles jouent un rôle essentiel dans la libération du K par le sol ; leur contribution représente souvent les 2/3 environ du K extractible total ;

— *les limons participent de façon importante à la libération du K*, leur contribution représente le 1/3 environ du K extractible total ;

— les sables ont le plus souvent un rôle faible ou négligeable. Le sol de la Pierre-qui-Vire fait exception à ce schéma général : la contribution des limons est équiva-

lente à celle de l'argile et les sables interviennent pour plus de 20 p. 100 dans le potassium libéré par le sol.

Les variations constatées pour une même fraction granulométrique peuvent être le fait :

— soit des répartitions très différentes des constituants du sol dans les trois classes granulométriques considérées,

— soit des quantités très différentes de K susceptibles d'être libérées par les fractions considérées.

TABLEAU 4

*Importance relative des fractions granulométriques dans la libération globale de K par l'échantillon de sol*

(en p. 100 du K libéré par le sol correspondant)

| | Sables | Limons | Argiles totales |
|---|---|---|---|
| $M_s$ | 4,5 | 41,2 | 54,3 |
| $M_{s/s}$ | 11,2 | 29,8 | 59,0 |
| $R_s$ | 2,2 | 34,7 | 63,1 |
| $Ro_s$ | 3,1 | 32,2 | 64,7 |
| $SP_s$ | 4,4 | 42,1 | 51,5 |
| $K_0N_1$ | 1,2 | 34,5 | 64,3 |
| $K_1N_1$ | 1,2 | 34,3 | 64,5 |
| $K_2N_1$ | 1,2 | 35,0 | 63,8 |
| $T_1$ | 3,9 | 26,4 | 69,7 |
| $T_6$ | 4,2 | 27,6 | 68,2 |
| $Al_0$ | 1,6 | 40,4 | 58,0 |
| $Al_2$ | 1,3 | 34,5 | 64,2 |
| $Om_0$ | 1,9 | 36,4 | 61,7 |
| $Om_3$ | 1,4 | 28,7 | 69,9 |
| $V_0$ | 21,3 | 43,8 | 34,9 |
| $V_M$ | 20,5 | 49,8 | 29,7 |

Ainsi la fraction sable de la Pierre-qui-Vire ($V_0$) qui libère, à l'exception de $T_1$, les quantités de K les plus faibles de l'ensemble des fractions sables étudiées, compense son faible niveau de libération par sa masse relative très importante vis-à-vis des limons et des argiles. Cela lui permet de jouer un rôle important dans la libération du K par le sol, bien que libérant beaucoup moins de K, lorsque celui-ci est exprimé en méq. K pour 100 g de la fraction. Inversement, dans les sols de la Somme ($Al_0$-$Om_0$), la fraction argile proportionnellement faible vis-à-vis des limons et des sables, joue un rôle essentiel dans la libération du K par ces sols, les quantités de K susceptibles d'être libérées par les argiles de ces sols étant particulièrement élevées.

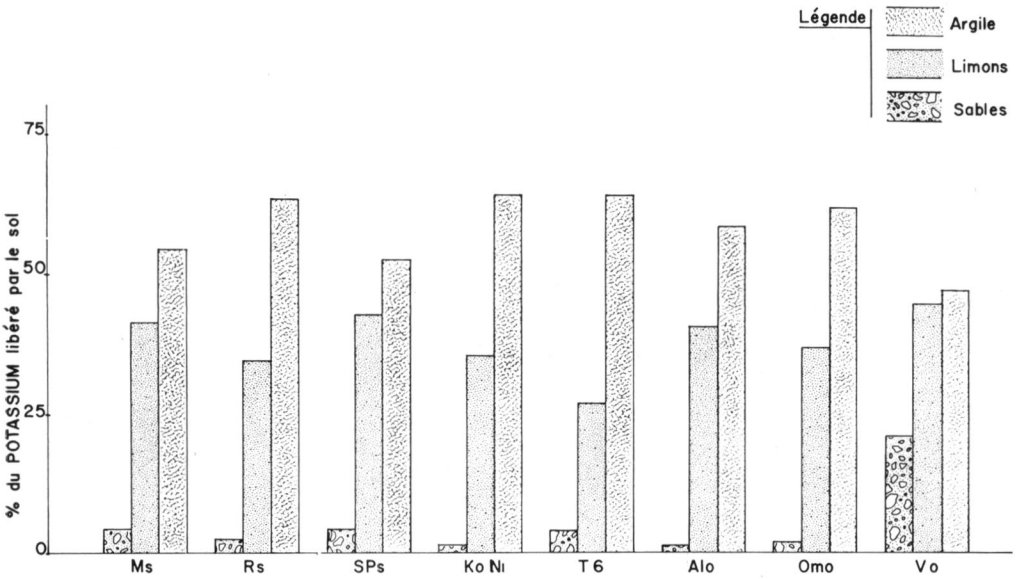



Figure 2 : Importance relative des différentes fractions granulométriques dans la libération du POTASSIUM par le sol.

## CONCLUSION

La libération du K par les fractions granulométriques du sol en présence de NaCl-NaTPB montre que les quantités de K libérées sont fonction de la taille de la fraction considérée, du type de sol dont elles sont issues, des traitements culturaux reçus et indépendantes de la teneur en potassium total des fractions.

La fraction argile libère, quel que soit le type de sol, les plus grandes quantités de potassium, les quantités maximales libérées étant obtenues pour la fraction argile grossière (0,5 $\mu$-2 $\mu$). La fraction limon libère des quantités de K intermédiaires entre les quantités de K libérées par les argiles et les quantités libérées par la fraction sable qui fournit toujours les valeurs les plus faibles.

Lorsque le sol a été enrichi par des apports d'engrais potassiques, l'enrichissement se traduit généralement par une libération plus importante de K par la fraction argileuse. Les autres fractions sont peu ou pas affectées.

L'étude simultanée du K libéré par les fractions granulométriques et par les sols dont elles sont issues permet, en fonction de la répartition granulométrique des constituants du sol, une approche du rôle relatif des diverses fractions considérées dans la libération du K par le sol. Si la fraction argile joue un rôle essentiel dans cette libération, la fraction limon et la fraction sable peuvent jouer un rôle important pouvant approcher celui des argiles pour la fraction limon de certains sols.

*Reçu pour publication en juin 1971.*

## SUMMARY

### POTASSIUM RELEASED BY THE PARTICLE-SIZE FRACTIONS OF THE SOIL IN PRESENCE OF SODIUM TETRAPHENYLBORATE

The release of potassium from the particle-size fractions of the soil was investigated using the NaCl-NaTPB reagent and 16 soil samples differing as to their origin and maintenance of their potassium-supply level.

After separating the fractions, these are put in contact together with the aforesaid reagent, for 120 hours. The amounts of released K per 100-gramme fraction, increase in the following sequence : sand, loam, clay.

The significance of the fractions as regards release of K from the soil as a whole depends on the latters' particle-size distribution. The amounts released by loams and even sands, may have a non negligible importance.

## ZUSAMMENFASSUNG

### FREIGABE DES KALIUMS DURCH DIE GRANULOMETRISCHEN BODENTEILE IN GEGENWART VON NATRIUMTETRAPHENYLBORAT

Die Freigabe des Kaliums durch die granulometrischen Bodenteile wurde mittels des Reagenz NaCl-NaTPB untersucht. Die Untersuchung bezog sich auf 16 Bodenstichproben, die hinsichtlich ihrer Herkunft und der Erhaltung ihres Kaliumniveaus verschieden waren.

Nach Trennung der verschiedenen Bodenteile werden dieselben während 120 st mit dem Reagenz Na CL-Na TPB in Berührung gebracht. Die für 100 g Bodenteil freigemachten K-Mengen steigen in der Reihenfolge : Sand, Lehm, Ton.

Die Bedeutung der Bodenteile bei der Freigabe des K durch den gesamten Boden wechselt in Abhängigkeit von der granulometrischen Zusammensetzung desselben. Die Menge der durch Lehm und sogar durch Sand freigemachten Mengen ist nicht zu unterschätzen.

## РЕЗЮМЕ

Освобождение калия гранулометрическими фракциями почвы в присутствии тетрафенилбората натрия.

Б. КАБИБЕЛЬ.

С помощью реактива NaCl–NaTPB изучалось освобождение калия гранулометрическими фракциями почвы. Изучение это проводилось на 16–ти образцах почв различного происхождения, с содержанием калия находившимся на разных уровнях.

После разделения на гранулометрические фракции почвы эти находились в течении 120–ти часов в контакте с реактивом NaCl–NaTPB. Количества калия освобожденного навесками в 100 гр. каждой фракции, увеличиваются в следующем порядке : песок – суглинок – глина.

Роль каждой фракции в освобождении калия совокупностью почвы, зависит от гранулометрического состава этой почвы. Количества калия освобожденного суглинками, или даже песками, могут достичь величин, которые необходимо принимать во внимание.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

JACKSON M. L., 1958. *Soil chemical analysis.* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.

REED M. G., SCOTT A. D., 1962. Kinetic of K release from biotite and muscovite in Na tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 437-440.

REED M. G., SCOTT A. D., 1966. Chemical extraction of K from soils and micaceous minerals with solution containing Na tetraphenylboron. IV. Muscovite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 185-188.

SCHULTE E. E., COREY R. B., 1963. Flame photometry determination of potassium precipitated in soil as potassium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 358-360.

SCOTT A. D., 1968. Effect of particle size on interlaying K exchange in micas. *IX^e Congrès Intern. Sci. Sol.*, Adelaïde, 649-659.

SCOTT A. D., HUNZIKER R. R., HANWAY J. J., 1960. Chemical extraction of K from soils and micaceous minerals with solutions containing Na tetraphenylboron. II. Preliminary experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 191-194.

SCOTT A. D., REED M. G., 1962. Chemical extraction of K from soils and micaeous minerals with solutions containing Na tetraphenylboron. II. Biotite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 41-45. III. Illite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 45-48.

SMITH S. J., CLARK J. J., SCOTT A. D., 1968. Exchangeability of potassium in soils. *IX^e Congrès Intern. Sci. Sol.*, Adelaïde, 661-669.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (6), 717-720.

# CHRONIQUE DES LIVRES

J. JACOBS, O. L. LANGE, J. S. OLSON, W. WIESER, ed. — ECOLOGICAL STUDIES, ANALYSIS AND SYNTHESIS. Vol. 2 :

H. ELLENBERG, ed. — INTEGRATED EXPERIMENTAL ECOLOGY. METHODS AND RESULTS OF ECOSYSTEM RESEARCH IN THE GERMAN SOLLING PROJECT., Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1971, 214 p.

Dans le premier volume de la collection *Ecological Studies*, édité par E. REICHLE, sont résumées les données existantes sur les aspects principaux des recherches écologiques faisant le point des connaisances actuelles et proposant un schéma d'analyse d'un écosystème donné en prenant pour exemple, le cas d'une forêt tempérée.

Ce second volume, *Integrated Experimental Ecology*, présente les premiers résultats de l'équipe du Projet Solling, projet établi dans le cadre du Programme biologique international par le Groupe de Travail de l'Allemagne fédérale.

Les écosystèmes étudiés sont deux prairies et deux forêts typiques de la région du Haut Solling. L'accent est essentiellement mis sur les aspects méthodologiques.

Le plan en est le suivant :

— Introduction,
— Production primaire,
— Production secondaire,
— Environnement,
— Validité des résultats.

Ces travaux se poursuivent encore actuellement et un volume de synthèse finale des résultats sera publié par la suite.

L. D.

M. PINTA. — SPECTROMÉTRIE D'ABSORPTION ATOMIQUE. — 2 vol., Paris, Masson et C^ie^, O. R. S. T. O. M., 1971, 286 + 508 p.

Cet ouvrage a été réalisé par une équipe de chercheurs spécialisés sous la direction de M. PINTA.

Depuis 1955, date des premières publications sur les applications de l'absorption atomique à l'analyse chimique, cette technique physique d'analyse s'est considérablement développée.

Le présent ouvrage constitue une mise au point d'application de la spectrométrie d'absorption atomique dans un domaine aussi étendu que possible intéressant la recherche et l'industrie.

Le volume I est consacré à l'aspect théorique et instrumental. Les principes de la méthode sont développés.

Un chapitre est consacré à l'appareillage avec une étude des appareils classiques et une description comparative de 30 spectomètres commerciaux. Une étude est faite sur les générateurs de radiations et les sources d'atomisation avec ou sans flamme. En traitant de la recherche des conditions optimales de l'analyse, M. PINTA pose les principes généraux qui doivent guider la mise au point d'une analyse par absorption atomique : préparation des échantillons, utilisation de la flamme, générateurs de radiations, contrôle et étalonnage du spectrophotomètre, contrôle de la validité de la méthode.

Le volume II se rapporte aux applications à l'analyse chimique du milieu : roches et sols,

minerais, eaux, milieux végétaux, biochimie, toxicologie, produits pétroliers, métaux et alliages, énergie nucléaire, génie civil.

Une bibliographie, un index auteurs et un index matières complètent cet ouvrage.

M. F.

J. Duthil. — Éléments d'écologie et d'agronomie. T. I : Connaissance du milieu. Paris, Baillère, 1971, 386 p. (Collection des ingénieurs des techniques agricoles).

Le premier tome de cet ouvrage concerne la description du milieu et de ses diverses propriétés, le second étant destiné à traiter des méthodes d'amélioration de ces conditions naturelles.

Ce premier tome est divisé en trois grands chapitres. Le premier étudie les éléments du climat et leur influence sur la plante. On y trouve, en particulier, les méthodes de mesure, d'enregistrement et de représentation du climat, ainsi que le problème de la complexité des réactions des végétaux. Il y est également traité des excès climatiques et des moyens de les combattre, ainsi que des serres, en tant que moyen de maîtriser les facteurs climatiques.

Le deuxième chapitre comporte une analyse des propriétés du sol : composition minérale et organique, propriétés colloïdales, structure, échanges, transfert thermique et circulation des gaz ; une division est consacrée à l'étude la flore et de la faune du sol.

Dans le dernier chapitre, on trouve, exposé plus brièvement, le rôle de l'eau dans le sol, en relation avec les plantes. Il y est question notamment des divers aspects de la rétention d'eau et des mouvements de celle-ci dans le sol ; ces points sont traités dans l'optique de l'influence qu'ils peuvent avoir sur les végétaux, et partant sur l'agronomie.

M. M.

J. D. Eastin, R. D. Munson, éd. — Moving off the yield plateau. — New York, American Society of Agronomy, 1971, 96 p., (ASA special publication n° 20).

Cette publication contient les communications présentées à un symposium, dans le cadre d'un meeting annuel, tenu le 25 août 1970, à Tucson (Arizona). Le problème commun traité dans ces divers articles est celui du « plateau » atteint dans l'obtention des récoltes et des moyens de le dépasser.

Le premier article est consacré aux aspects biochimiques et physiologiques de l'agriculture : on y trouve une étude générale de l'action des herbicides et des substances agissant sur la croissance des plantes, une analyse des aspects de la nutrition et des engrais et une revue des relations entre la génétique et la physiologie des plantes. S. B. Hendricks.

Un article est consacré plus spécialement à l'amélioration et à la sélection des plantes cultivées ; on y trouve les progrès réalisés dans l'application de la génétique en agriculture. J. K. Frey.

L'article suivant traite des moyens de protection chimique, soit d'un seul type, soit de plusieurs types associés. M. F. Kernkamp.

Un autre article s'occupe de l'influence, de l'utilisation et de l'amélioration de la fertilité du sol. S. E. Younts.

Un dernier article est consacré aux problèmes d'exploitation et d'organisation plus efficace de la production agricole. T. J. Army, D. R. Isleib, F. A. Greer.

M. M.

M. L. Martin, G. J. Martin — Manuel de résonance magnétique nucléaire. — Paris, Azoulay, 1971, 214 pages., (Coll. Laboratoires et analyses).

Cet ouvrage traite de la théorie et de la pratique de la RMN, l'accent étant mis sur les utilisations en laboratoire de ce domaine.

Un chapitre est consacré au principe et aux techniques expérimentales. Il est ensuite traité des propriétés de la matière, sur lesquelles la méthode de la RMN est susceptible de donner des renseignements ; les notions de déplacement chimique et de couplage spin-spin y sont en particulier définies.

Un chapitre important est consacré à l'étude et à l'interprétation des spectres de RMN.

On trouve ensuite les applications de cette méthode à la stéréochimie et aux mesures quantitatives.

Le livre est destiné essentiellement à initier le chercheur aux bases scientifiques de la méthode et à lui permettre son utilisation en laboratoire.

M. M.

TRANSITION FROM EXTENSIVE TO INTENSIVE AGRICULTURE WITH FERTILIZERS. — (Proceedings of the VIIth Colloquium of the International Potash Institute, Israel, 1969) Bern, Intern. Potash Institute 1971, 282 pages.

Ce livre expose les travaux d'un colloque international, tenu en Israël, en 1969. On y trouve traités les problèmes du passage d'une agriculture extensive à une agriculture intensive, appliqués plus spécialement aux conditions d'Israël.

Les sessions sont consacrées à des questions comme l'obtention du rendement maximum, les besoins nutritionnels des plantes, l'irrigation, les divers facteurs culturaux qui déterminent la croissance et le développement des plantes. Il y est également traité des problèmes économiques, de l'utilisation des engrais, ainsi que du problème de l'organisation et de l'éducation des agriculteurs.

Le livre donne également le texte des conférences tenues pendant les excursions scientifiques et techniques effectuées en Israël dans le cadre de ce Colloque.

M. M.

L. M. WALSH, éd. — INSTRUMENTAL METHODS FOR ANALYSIS OF SOILS AND PLANT TISSUE. — Madison (Wisconsin), Soil Science Society of America, Inc., 1971, 222 p.

Cet ouvrage est une revue des méthodes actuelles d'analyse chimique des plantes et des sols ; il tient compte des nouvelles techniques et des progrès accomplis dans ce domaine.

Des chapitres sont consacrés à la combustion automatique, à l'absorption atomique et à la photométrie de flamme, aux électrodes ioniques, à la spectrographie d'émission aux rayons X, à la fluométrie et à la néphélométrie, à la chromatographie en phase gazeuse, à l'activation des neutrons, à la microanalyse électronique ainsi qu'aux diverses applications des auto-analyseurs. Les appareils et instruments modernes y sont décrits, avec leurs avantages et les nouveaux renseignements qu'ils apportent.

De l'ouvrage, il ressort que la technologie moderne permet une connaissance plus fine des problèmes comme le métabolisme des plantes, les modifications du sol, les interrelations plante-sol, la pollution et les résidus.

M. M.

K. H. HARTGE. — DIE PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNG VON BÖDEN. — Stuttgart, Ferdinand Enke, 1971, 168 p.

Cet ouvrage traite de certaines propriétés physiques et mécaniques du sol et des méthodes employées pour leur étude. Un premier chapitre est consacré aux principes de la mesure et de l'estimation en général ; les techniques d'échantillonnage sont traitées dans un chapitre suivant.

On trouve ensuite des chapitres traitant des problèmes particuliers pour la détermination de chaque type de propriétés ; porosité, densité, stabilité de la structure, texture.

Les divers problèmes liés à l'eau du sol sont traités dans plusieurs chapitres : teneur en eau, tension, circulation, perméabilité, etc.

Ce livre est donc essentiellement consacré aux corrélations entre la structure et l'eau du sol, ainsi qu'à leurs modifications.

M. M.

M. DELHAYE, A. CORNU, G. BAUDIN. — EMPLOI DES LASERS EN ANALYSE CHIMIQUE. — Paris, Azoulay, 1971, 121 p., (Coll. Laboratoires et analyses).

Ce livre comporte un premier chapitre consacré à la théorie des sources de lumière laser et des chapitres qui traitent des applications de ces sources en analyse chimique.

Dans le premier chapitre on trouve les principes et les propriétés de la source laser, ainsi que la description des divers types de lasers.

Les chapitres suivants sont consacrés aux utilisations des lasers en spectroscopie Raman et infrarouge, en spectrométrie de masse et en spectrographie d'émission.

Pour chacune de ces méthodes, on trouve des explications de principes théoriques, ainsi que les descriptions des techniques de réalisation.

M. M.

D. M. GATES, L. E. PAPIAN. — ATLAS OF ENERGY BUDGETS OF PLANT LEAVES. — London, New York, Academic Press, 1971, 279 p.

Le bilan d'énergie d'un organisme vivant dépend de quatre facteurs indépendants : le rayonnement, la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité. La température de la feuille et la transpiration représentent deux variables dépendantes des précédentes.

Ces différentes grandeurs combinées avec la résistance à la diffusion dans la feuille et aux dimensions de cette dernière, permettent d'établir une équation du bilan d'énergie. Les termes de cette équation sont expliqués et justifiés : certains coefficients ont été déterminés par voie empirique dans une soufflerie.

La résolution de cette équation est présentée sous forme d'une tabulation numérique (280 tableaux) et d'une série de 100 graphiques qui représentent les combinaisons de variables les plus probables et les plus intéressantes. Les graphiques permettent de connaître *a priori* la relation entre deux variables si les six autres sont connues.

S. P.

*Ann. agron.*, 1971, **22** (6), 721-723.

# TABLE DES MATIÉRES DE L'ANNÉE 1971

G. Barbier, J.-C. Fardeau, P. Marini. — Sur la diffusibilité des ions-phosphate du sol ..... 309

R. Blanchet, M. Bosc, N. Gelfi, A. Hilaire. — Vieillissement d'engrais phosphatés dans le sol et conduite de la fertilisation ..... 687

R. Bonhomme, P. Chartier, C. Varlet-Grancher. — Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. II. — Éclairement d'un plan horizontal au-dessus et aux différents niveaux de la culture ..... 383

B. Cabibel. — Libération du potassium par les fractions granulométriques du sol en présence de tétraphénylborate de sodium ..... 705

R. Chaminade. — Recherches sur la rétrogradation de l'ion ammonium .... 343

P. Chartier, A. Perrier, M. Verbrugghe. — Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. I. — Objectifs et présentation du dispositif expérimental de la Minière ..... 367

J. Chrétien. — Essai de caractérisation des sables en tant que squelette minéral du sol ..... 615

C. Courpron. — Détermination de la constante de stabilité des complexes formés entre le fer et les substances contenues dans l'extrait aqueux de résidus de végétaux d'origines diverses ..... 527

Ph. Daget, J. Poissonet. — Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application ..... 5

J. Delas. — Évolution des propriétés d'un sol sableux sous l'influence d'apports massifs et répétés de matières organiques de différentes origines .. 585

R. Durand, P. Dutil. — Premiers résultats sur l'altération expérimentale de roches calcaires et dolomitiques ..... 397

L. Duval. — Le dosage du molybdène dans les végétaux. Examen des divers procédés de détermination. Mise au point d'une méthode colorimétrique au thiocyanate ..... 127

J.-C. Fardeau, P. Marini. — Étude par échange isotopique de la transformation dans un sol sans végétation de divers engrais phosphatés après 35 applications annuelles ..... 113

A. Faure. — Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification ..... 487

J.-C. Fiès. — Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols ..... 655

A. Fleury. — Irrégularités de semis et composantes du rendement de la bette-

rave sucrière. Essai de méthodologie ..... 291

Ph. GRAFFIN. — Étude intégrée de la décomposition d'apports organiques dans le sol. Évolution du carbone et de l'azote, liaison à la fraction minérale, modification des propriétés physiques ..... 213

R. GRAS, P.-L. OSTY, J.-P. DEFFONTAINES, A. MARIN-LAFLÈCHE. — Contribution à l'étude de la culture de la Betterave à sucre sur des sols légers du Laonnois et de la Champagne de l'Aisne ..... 537

A. LANGLET. — Essai de prévision de l'orientation de la production agricole dans diverses régions naturelles, en fonction des facteurs écologiques .... 425

Suzanne MÉRIAUX. — Arrière-effet de l'irrigation sur le premier cycle de deux graminées fourragères (*Dactylis glomerata* L. et *Festuca pratensis* L.) ... 95

G. MONNIER. — Étude en cases lysimétriques de l'influence de la profondeur du sol sur le rendement des cultures ..... 183

J.MORIZET, R. MILLET. — Étude de la mobilité de l'eau non saturante dans des colonnes de sols soumises à l'évaporation ; influence de la texture et de la teneur en matière organique ..... 197

P.-L. OSTY. — Influence des constituants du sol sur son humidité à pF 3 ... 451

J.-C. RÉMY. — Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol ..... 267

M. ROBERT. — Étude expérimentale de l'évolution des micas (Biotites). I. — Les aspects du processus de vermiculitisation ..... 43

II. — Les autres possibilités d'évolution des micas et leur place par rapport à la vermiculitisation ..... 155

W. ROUTCHENKO, J.-P. SOYER. — Sur les causes de la germination sur plante des grains immatures de Maïs. Résultats préliminaires ..... 241

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. III. — Composition spectrale de la lumière dans la culture ..... 515

*Chronique des Livres* ..... 257, 477, 717.

## CONTENTS

G. BARBIER, J.-C. FARDEAU, P. MARINI. — On the diffusibility of phosphate ions in soil ..... 309

R. BLANCHET, M. BOSC, N. GELFI, A. HILAIRE. — Ageing of phosphatic fertilizers in the soil and fertilization control ..... 687

R. BONHOMME, P. CHARTIER, C. VARLET-GRANCHER. — Net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy. II. — Irradiance of horizontal planes above and at different levels inside the canopy ..... 383

B. CABIBEL. — Potassium released by the particle-size fractions of the soil in presence of sodium tetraphenylborate ..... 705

R. CHAMINADE. — Investigations on the fixation of the ammonium ion ..... 343

P. CHARTIER, A. PERRIER, M. VERBRUGGHE. — Net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy. I. — Object of the work presentation of the experimental field of « La Minière » ..... 367

J. CHRÉTIEN. — An attempt to characterize sands by considering them as mineral soil skeletons ..... 615

C. COURPRON. — Determination of the stability constants of complexes formed by iron with substances present in the aqueous extract of plant residues of diverse origin ..... 527

Ph. DAGET, J. POISSONET. — A method to analyze the vegetation in herbages. Application possibilities ..... 5

J. DELAS. — Changes in the properties of a sandy soil resulting from massive and repeated additions of organic matter from various sources ..... 585

R. DURAND, P. DUTIL. — Initial results of experimental weathering of calcareous and dolomite rocks ..... 397

L. DUVAL. — Determination of the molybdenum content in plants. Analysis of the various determination processes. Development of a colorimetric thiocyanate method ..... 127

J.-C. FARDEAU, P. MARINI. — Study through isotopic exchange of the transformation in a plantless soil of various phosphatic fertilizers after 35 yearly fertilizing applications ..... 113

A. FAURE. — Contribution to the study of the mechanism of soil compaction. The concept of lubrification potentiel ..... 487

J.-C. FIÈS. — Textural aspect of soil porosity ..... 655

A. FLEURY. — Uneven sowing and yield components in the sugar beet. Methodology trial ..... 291

Ph. GRAFFIN. — Comprehensive study on the decomposition of natural manures in the soil. Evolution of carbon and nitrogen ; bonding with the mineral fraction, changing physical properties ..... 213

R. GRAS, P.-L. OSTY, J.-P. DEFFONTAINES, A. MARIN-LAFLÈCHE. — A contribution to the study of sugar beet cultivation in the light soils of the Laon and Champagne regions of the Aisne Department ..... 537

A. LANGLET. — An attempt to forecast the orientation of agricultural production in various regions on the basis of ecological factors ..... 425

Suzanne MÉRIAUX. — Irrigation after-effect on the first agricultural cycle of two graminaceous grasses (*Dactylis glomerata* L. and *Festuca pratensis* L.) 95

G. MONNIER. — Lysimetric investigation on the relationship between the depth of soil and crop yields ..... 183

J. MORIZET, R. MILLET. — Study on the mobility of unsaturated water in columns of soil subjected to evaporation. Effects of the texture and the organic-matter content ..... 197

P.-L. OSTY. — The influence of soil constituents on its moisture content at pF 3 ..... 451

J.-C. RÉMY. — The influence of physical composition on the mechanical behavior of soils ; the significance of Atterberg limits with respect to soil cultivation ..... 267

M. ROBERT. — Experimental study of the weathering of micas (biotites). I. — Aspects of the vermiculitization process ..... 43

II. — The other evolution possibilities of micas and their relationship with respect to vermiculitization ..... 155

W. ROUTCHENKO, J.-P. SOYER. — On the causes of premature germination in immature grains of Maize. Preliminary results ..... 241

C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME. — Net assimilation, water use and microclimate of a maize canopy. III. — Spectral composition of the light inside the crop ..... 515

*Book reviews* ..... 257, 477, 717.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

*Au début de chaque mémoire*, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

*Les mémoires* seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions ;* f) *résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

*Les travaux originaux en anglais* doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

*Pour les autres documents* (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

*Les références bibliographiques* doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

*Pour les articles :* le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

*Pour les ouvrages :* le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

*Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies*, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée et porter les numéros des figures.

*Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils* seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

*Photographies :* Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

*Correction des épreuves :* les auteurs recevront une épreuve a corriger.

*Envoi du manuscrit :* M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Agronomie.

*Le directeur de la publication:* M.-L. CAGNAC

---

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1972

---

*Dépôt légal: 1er trimestre 1972. N° d'impression: 1688.*